

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



**Avaliação numérica de bombas de calor assistidas por
coletores solares no aquecimento de habitações para o clima
de Portugal**

José Miguel Dias Caixeiro

Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

Dissertação orientada por:
Professora Doutora Marta João Nunes Oliveira Panão
Doutora Carolina de Sousa Fraga

2018

Resumo

Face ao crescimento das necessidades energéticas para o setor doméstico em Portugal têm surgido novas tecnologias que permitem promover não só uma poupança económica, a curto, médio ou longo prazo, como a redução do impacto ambiental e do consumo energético.

Assim, surgem os sistemas híbridos, que permitem responder às necessidades de aquecimento ambiente (AA) e aquecimento de águas quentes sanitárias (AQS) de um edifício e que apresentam diversas configurações para diferentes climas. Esta variedade engloba os tipos de coletor solar, as aplicações para o calor produzido pelo coletor, as fontes de calor usadas para a bomba de calor, o tipo de refrigerante da bomba de calor, o tipo de armazenamento, a fonte de recurso, no caso da bomba, coletor e depósito não conseguir suprir as necessidades, o tipo de clima onde o sistema se insere, a carga necessária a produzir pelo sistema, entre outros.

O sistema em estudo consiste numa bomba de calor diretamente acoplada a um conjunto de coletores solares sem vidro, que podem funcionar como produtores diretos de energia solar ou absorsores para a bomba de calor, possuindo uma ligação direta com a bomba sem armazenamento intermédio. O calor produzido por produção direta pelos coletores ou por produção da bomba de calor é usado para responder às necessidades de aquecimento de AQS ou de AA, dando prioridade ao AQS, uma vez que o calor produzido em excesso é armazenado nos depósitos centrais. Este sistema não permite o aquecimento prévio dos depósitos por parte do coletor solar.

Este sistema foi implementado em dois climas distintos – Lisboa e Viseu. Para ambos variou-se as necessidades de aquecimento ambiente, temperatura limite do evaporador da bomba de calor e a área de coletor. Para os dois climas verifica-se que, na presença de um edifício bem isolado, as necessidades de aquecimento ambiente são muito reduzidas.

Para Lisboa verifica-se que a maior parte da energia produzida para responder às necessidades de AQS e AA provém da bomba de calor, sendo este o principal componente do sistema responsável pela resposta às necessidades de aquecimento. Este facto é salientado pela obtenção de um fator de desempenho sazonal (*Seasonal Performance Factor*, SPF) de sistema e de bombas bastante semelhantes. Ademais, verifica-se que para a temperatura limite do evaporador de $-7,5^{\circ}\text{C}$ não existe consumo de energia por parte da resistência elétrica e que quanto maior a área de coletor solar maiores são os valores de SPF da bomba e do sistema. Para a bomba de calor foi obtido um SPF máximo de 3,57 e para o sistema um SPF máximo de 3,62, para uma área de coletor sobre a área total aquecida de $0,17 \text{ m}^2/\text{m}^2$.

Para Viseu verifica-se que a temperatura limite do evaporador da bomba de calor é uma variável limitante para este clima e para a carga do edifício em estudo, existindo um aumento da produção de energia por parte da resistência elétrica com o aumento da temperatura limite, afetando significativamente o SPF do sistema. O aumento da área de coletor produz um aumento do SPF da bomba e do sistema, obtendo-se valores máximos para a bomba e para o sistema de 3,33 e 4,36, respetivamente, para uma área de coletor sobre a área total aquecida de $0,17 \text{ m}^2/\text{m}^2$. Por último, conclui-se que o sistema é uma boa solução para zonas climáticas de inverno de categoria I2 e para um valor de GD igual ou superior a 1563.

Palavras-Chave: Energia, águas quentes sanitárias, aquecimento ambiente, Fator de desempenho sazonal.

Abstract

In light of the growing energy needs for the domestic sector in Portugal new technologies have emerged, not only to promote a short, medium or long term economic savings but also to reduce a environmental impact and energy consumption.

Therefore, hybrid systems are developed, which allow to respond to the needs of space heating (SH) and domestic hot water (DHW) of a building and that present diverse configurations for different climates. This variety includes the types of solar collector, the applications for the heat produced by the collector, the heat sources used for the heat pump, the type of heat pump refrigerant, the type of storage, the resource source, in the case the pump, the collector and the tank can not meet the needs, the type of climate where the system is inserted, the necessary load to be produced by the system, among others.

The system under study consists of a heat pump directly coupled to a set of solar collectors without glass, which can work as direct producers of solar energy or absorbers for the heat pump, having a direct connection to the pump without intermediate storage. Heat produced by direct collector production or by heat pump production is used to respond to heating needs of DWH or SH, giving priority to DWH, since excess heat produced is stored in the central tanks. This system does not allow previous heating of the deposits by the solar collector.

This system was implemented in two distinct climates - Lisbon and Viseu. For both the requirements of ambient heating, evaporator limit temperature of the heat pump and the collector area were studied. For both climates it is found that, in the presence of a well-insulated building, the ambient heating needs are very low.

For Lisbon, most of the energy produced to meet the needs of DWH and SH comes from the heat pump, which is the main component of the system responsible for responding to heating needs. This is highlighted by obtaining a system and heat pump seasonal performance factor (SPF) very similar. In addition, it is verified that for the evaporator limit temperature of -7.5°C there is no energy consumption by the electrical resistance and the larger the solar collector area the higher the SPF values of the heat pump and the system. For the heat pump was obtained a maximum SPF of 3,57 and for the system a maximum SPF of 3,62 for a collector area over the total heated area of $0,17 \text{ m}^2 / \text{m}^2$.

For Viseu it is verified that the temperature limit of the evaporator of the heat pump is a limiting variable for this climate and for the load of the building under study, increasing the energy production by the electrical resistance with the increase of the limit temperature, affecting significantly the SPF of the system. The increase of the collector area produces an increase of the SPF of the heat pump and the system, obtaining maximum values for the heat pump and for the system of 3,33 and 4,36, respectively, for a collector area over the total heated area of $0,17 \text{ m}^2 / \text{m}^2$. Finally, it is concluded that the system is a good solution for winter climatic zones of category I2 and for a GD value equal to or greater than 1563.

Palavras-Chave: Energy, domestic hot water, space heating, Seasonal performance factor.

Índice

Resumo	iii
Abstract	iv
Lista de figuras	vii
Lista de tabelas	ix
Lista de abreviaturas.....	x
1. Introdução.....	1
1.1. Contextualização	1
1.2. Estado de arte	3
1.3. Objetivos e Estrutura	5
2. Sistema	7
2.1. Caracterização dos componentes.....	7
2.1.1. Coletor solar	7
2.1.2. Bomba de calor.....	8
2.1.3. Armazenamento.....	9
2.2. Propriedades	9
3. Validação do Modelo	11
3.1. Monitorizado - <i>MATLAB</i>	13
3.2. <i>TRNSYS</i> - <i>MATLAB</i>	15
4. Caso de estudo.....	19
4.1. Edifício	19
4.2. Envolvente opaca	21
4.3. Vãos envidraçados.....	23
4.4. Ocupação	24
4.5. Iluminação e equipamentos elétricos.....	24
4.6. Clima	25
4.7. Infiltração	28
4.8. AQS e AA	29
5. Resultados	31
5.1. Cenários de estudo.....	31
5.2. Variante Aquecimento ambiente	32
5.2.1. Lisboa	32
5.2.2. Viseu.....	36
5.3. Variante Temperatura limite do evaporador da bomba de calor	40
5.3.1. Lisboa	40
5.3.2. Viseu.....	42

5.4.	Variante Área de coletor.....	43
5.4.1.	Lisboa	43
5.4.2.	Viseu.....	45
6.	Conclusões e trabalho futuro	47
6.1.	Conclusões	47
6.2.	Trabalho Futuro	48
7.	Referências	49
8.	Anexos.....	50

Lista de figuras

Figura 1.1 – Consumo de energia elétrica por setor de atividade, em Portugal [2].....	1
Figura 1.2 – Necessidades energéticas de uma habitação, por tipo de energia e utilização [2].	2
Figura 1.3 – Consumo de energia elétrica por tipo de utilização [2].....	2
Figura 1.4 – Exemplo introdutório da visualização do esquema (adaptado de Frank et al.) [8].	4
Figura 1.5 – Esquema de notação [8].	4
Figura 2.1 – Modos de funcionamento do sistema (adaptado de Fraga C.[10]).....	10
Figura 3.1 – Fluxos de energia do sistema [10].....	11
Figura 3.2 – Representação gráfica dos resultados obtidos após simulação em <i>MATLAB</i> para a categoria Entrada. As linhas a tracejado representam os valores medidos por Fraga C.[10] e as linhas a cheio os valores simulados em <i>MATLAB</i>	13
Figura 3.3 – Representação gráfica dos resultados obtidos após simulação em <i>MATLAB</i> para a Saída. As linhas a tracejado representam os valores medidos por Fraga C.[10] e as linhas a cheio os valores simulados em <i>MATLAB</i>	14
Figura 3.4 – Representação gráfica dos resultados obtidos após simulação em <i>MATLAB</i> para a categoria Depósito. As linhas a tracejado representam os valores medidos por Fraga C. [10] e as linhas a cheio os valores simulados em <i>MATLAB</i>	15
Figura 3.5 – Representação gráfica dos resultados obtidos após simulação em <i>MATLAB</i> para a Entrada. As linhas a tracejado representam os valores simulados por Fraga C. [10] em <i>TRNSYS</i> e as linhas a cheio os valores simulados em <i>MATLAB</i>	16
Figura 3.6 – Representação gráfica dos resultados obtidos após simulação em <i>MATLAB</i> para a Saída. As linhas a tracejado representam os valores simulados por Fraga C. [10] em <i>TRNSYS</i> e as linhas a cheio os valores simulados em <i>MATLAB</i>	16
Figura 3.7 – Representação gráfica dos resultados obtidos após simulação em <i>MATLAB</i> para o Depósito. As linhas a tracejado representam os valores simulados por Fraga C.[10] em <i>TRNSYS</i> e as linhas a cheio os valores simulados em <i>MATLAB</i>	17
Figura 4.1 – Fachada principal do edifício utilizado no caso de estudo [12].	19
Figura 4.2 – Fachada posterior do edifício utilizado no caso de estudo [12].	20
Figura 4.3 – Representação do caso de estudo em <i>Sketchup</i>	20
Figura 4.4 – Representação gráfica da carga elétrica para o dia do mês de outubro, considerando a iluminação e os equipamentos elétricos.	25
Figura 4.5 – Temperatura em graus Celsius para a cidade de Lisboa, em dias e meses, durante um ano.	26
Figura 4.6 – Temperatura em graus Celsius para a cidade de Viseu, em dias e meses, durante um ano.	26
Figura 5.1 – Necessidades de aquecimento de AA e AQS para os cenários de Lisboa.	33
Figura 5.2 – Resultados obtidos para a categoria Entrada para os cenários de Lisboa.	33
Figura 5.3 – Resultados obtidos para a categoria Saída para os cenários de Lisboa.	34
Figura 5.4 – Resultados obtidos para a categoria Depósito para os cenários de Lisboa.	35
Figura 5.5 – Resultados obtidos para a categoria Desempenho para os cenários de Lisboa.	35
Figura 5.6 – Necessidades de aquecimento de AE e AQS para os cenários de Viseu.	37
Figura 5.7 – Resultados obtidos para a categoria Entrada para os cenários de Viseu.	38
Figura 5.8 – Resultados obtidos para a categoria Saída para os cenários de Viseu.	39
Figura 5.9 – Resultados obtidos para a categoria Depósito para os cenários de Viseu.	39
Figura 5.10 – Resultados obtidos para a categoria Desempenho para os cenários de Viseu.	40

Figura 5.11 – Fator de desempenho sazonal da bomba e do sistema para o clima de Lisboa, para a variante temperatura limite do evaporador da bomba de calor.	41
Figura 5.12 – Fator de desempenho sazonal da bomba e do sistema para o clima de Viseu, para a variante temperatura limite do evaporador da bomba de calor.	43
Figura 5.13 – Fator de desempenho sazonal da bomba e do sistema para o clima de Lisboa, para a variante área de coletor solar.	45
Figura 5.14 – Fator de desempenho sazonal da bomba e do sistema para o clima de Viseu, para a variante área de coletor solar.	46
Figura 8.1 – Água/Água Bomba de calor: Calor do condensador em kW em função da temperatura do evaporador e do condensador (T_{EvapIn} e T_{condOut} , expressas em °C) [10].	50
Figura 8.2 – Água/Água Bomba de calor: eletricidade consumida em kW em função da temperatura do evaporador e do condensador (T_{EvapIn} e T_{condOut} , expressas em °C) [10].	50
Figura 8.3 – Rés-do-chão do edifício do caso de estudo [12].	50
Figura 8.4 – Piso1, Piso2 e Piso3 do edifício do caso de estudo [12].	51

Lista de tabelas

Tabela 3.1– Resultados obtidos para os valores monitorizados, para a simulação em <i>TRNSYS</i> e em <i>MATLAB</i> , e o erro associado entre os valores obtidos (monitorizados - <i>MATLAB</i>) e (<i>TRNSYS</i> – <i>MATLAB</i>).	12
Tabela 4.1 – Materiais e respetivas propriedades das soluções construtivas do edifício em estudo.	21
Tabela 4.2 – Valores das resistências térmicas superficiais de R_{se} e R_{si} . [14]	23
Tabela 4.3 – Valores de coeficiente de transmissão térmica para as soluções construtivas do edifício isolado.	23
Tabela 4.4 - Valores de coeficiente de transmissão térmica para as soluções construtivas do edifício não isolado.....	23
Tabela 4.5 – Percentagem de ocupação nas zonas fundamentais do edifício, por período horário.....	24
Tabela 4.6 – Valores da temperatura exterior média ($T_{ext\ médio}$) e radiação global ($G_{total\ média}$) mensal, para Lisboa e Viseu.	27
Tabela 4.7 – Dias julianos correspondentes ao início e fim da estação de aquecimento.....	28
Tabela 4.8 – Renovações de ar por hora para os dois tipos de vidro, para o clima de Lisboa e Viseu [20].	28
Tabela 4.9 – Horários e percentagem de utilização de águas quentes sanitárias do edifício em estudo.	29
Tabela 5.1 – Cenários de estudo para o sistema para os climas de Lisboa e Viseu.	31
Tabela 5.2 – Resultados do sistema para os cenários de estudo correspondentes ao clima de Lisboa..	32
Tabela 5.3 – Resultados do sistema para os cenários de estudo correspondentes ao clima de Viseu. ..	36
Tabela 5.4 – Valores do sistema para os vários valores de temperatura limite do evaporador da bomba de calor para o clima de Lisboa.	41
Tabela 5.5 – Valores do sistema para os vários valores de temperatura limite do evaporador da bomba de calor para o clima de Viseu.	42
Tabela 5.6 – Resultados obtidos para o sistema em função da área de coletor escolhida sobre a área total de aquecimento, para o clima de Lisboa, expressos em kWh/(m ² .ano).	44
Tabela 5.7 – Valores em kWh/(m ² .ano) para o sistema em função da área de coletor escolhida sobre a área útil total de aquecimento para o clima de Viseu.	45

Lista de abreviaturas

AA – Aquecimento ambiente

AQS – Aquecimento de águas quentes sanitárias

COP – Coeficiente de desempenho operacional

E_{dir} – Energia produzida pela resistência elétrica

E_{hp} – Energia consumida pela bomba de calor

n_i – início da estação de aquecimento

n_f – fim da estação de aquecimento

Q_{AA} – Necessidade de aquecimento ambiente

Q_{AQS} – Necessidade de aquecimento de águas quentes sanitárias

$Q_{hp,dem}$ – Calor fornecido pela bomba para responder às necessidades de aquecimento de águas quentes sanitárias e de aquecimento ambiente

$Q_{hp,st}$ – Calor fornecido pela bomba de calor que é armazenada no depósito

$Q_{sol,dem}$ – Calor fornecido diretamente pela componente solar para responder às necessidades de aquecimento de águas quentes sanitárias e de aquecimento ambiente

$Q_{sol,dir}$ – Calor fornecido diretamente pela componente solar para aquecimento de águas quentes sanitárias, aquecimento ambiente e armazenamento no depósito

$Q_{sol,hp}$ – Calor fornecido pela componente solar para a bomba de calor

$Q_{sol,st}$ – Calor fornecido pela componente solar que é armazenada no depósito

$Q_{st,dem}$ – Calor fornecido pelo depósito para suprir as necessidades de aquecimento de águas quentes sanitárias e de aquecimento ambiente

$Q_{st,loss}$ – Calor perdido pelo depósito

SPF – Fator de desempenho sazonal

SPF_{hp} – Fator de desempenho sazonal da bomba de calor

SPF_{sys} – Fator de desempenho sazonal do sistema

1. Introdução

1.1. Contextualização

A crescente preocupação com o aumento do aquecimento global levou a reforçar a importância da Eficiência Energética. Esta surge como uma solução para alterar a tendência do aumento do aquecimento global e do desequilíbrio do ecossistema ambiental, económico e social. No quotidiano da população portuguesa a palavra Eficiência é cada vez mais proferida, seja na classificação de habitações ou de aparelhos eléctricos. A sua aplicação promove não só uma poupança económica, a curto, médio ou longo prazo, como a redução do impacto ambiental e do consumo energético.

Em Portugal, o consumo de energia eléctrica total representava 27,8 TWh no ano 1994, sofrendo um aumento de cerca de 70% até o ano 2016. Contudo, este crescimento não foi constante e nos primeiros treze anos, entre 1994 e 2007, este indicador sofreu um aumento total de cerca de 79%, ocorrendo seguidamente uma queda entre 2008 e 2009 e entre 2011 a 2014, de cerca de 1 e 7%, respetivamente. Para este indicador surgem três sectores de atividade que se destacam em termos de consumo eléctrico, nomeadamente os sectores da indústria, doméstico e o setor não doméstico, apresentando um peso relativo em termos percentuais para o ano de 2016 de 37,2%, 27,7% e 26,6%, respetivamente (Figura 1.1) [1]. Devido ao setor doméstico representar o segundo maior consumidor de energia, revela-se de extrema importância caracterizar o setor residencial para análise do consumo de energia eléctrica.

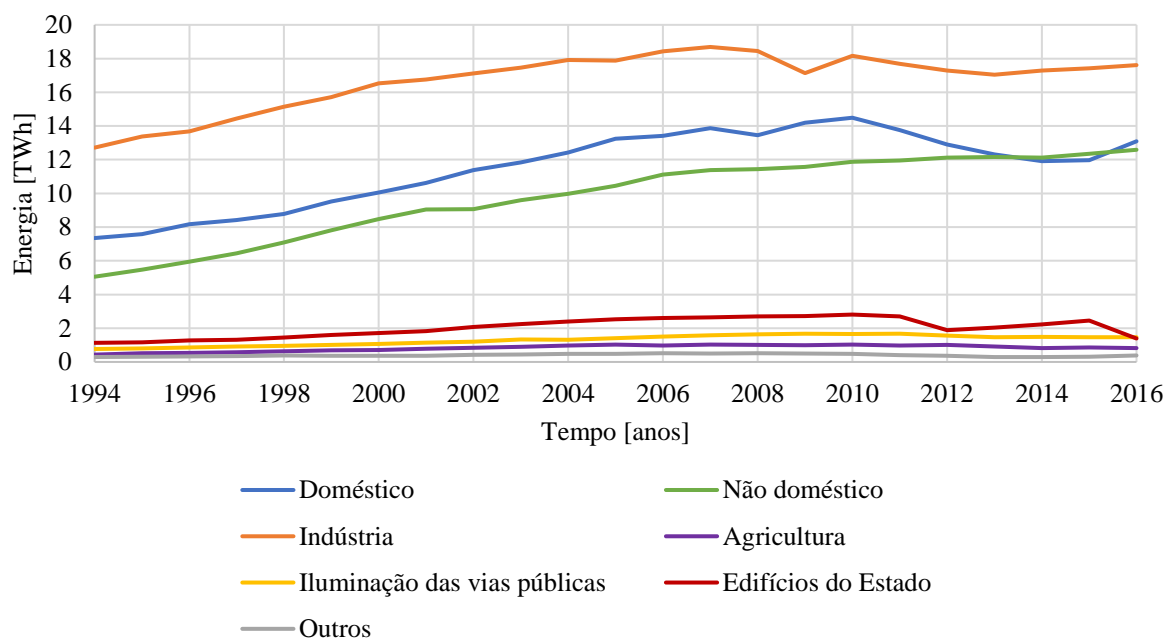


Figura 1.1 – Consumo de energia eléctrica por setor de atividade, em Portugal [2].

O número de edifícios residenciais contabilizados em Portugal até ao ano de 2011 representa cerca de 3,5 milhões, com a maior parte da construção a ser realizada no período entre 1971 a 1990, representando aproximadamente 33% dos edifícios existentes até 2011 [2].

As necessidades energéticas das habitações podem ser divididas por tipo de energia e por tipo de utilização. Neste último insere-se o aquecimento e arrefecimento do ambiente, aquecimento de águas quentes sanitárias, cozinha, equipamentos eléctricos e iluminação, onde podem ser utilizadas diferentes

fontes de energia para responder às necessidades, tais como eletricidade, gás natural, carvão, entre outros (Figura 1.2).

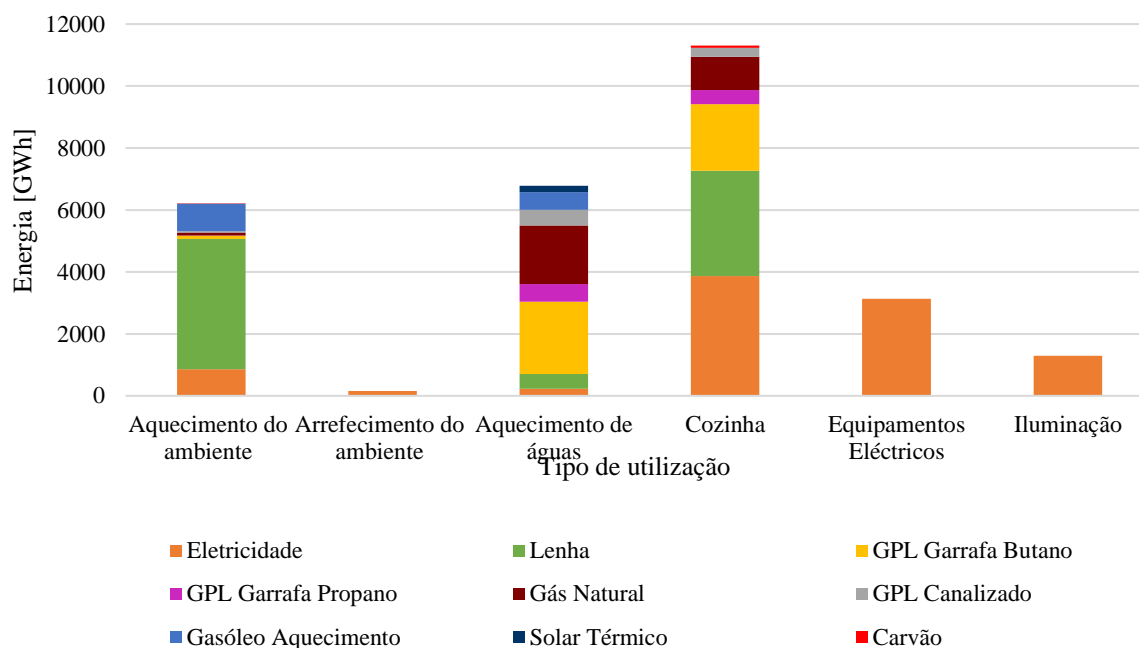


Figura 1.2 – Necessidades energéticas de uma habitação, por tipo de energia e utilização [2].

Para o ano 2010, em Portugal, foram recolhidos e analisados os consumos de energia por alojamento, por tipo de energia e por tipo de utilização, tendo-se concluído que a eletricidade representa a maior fonte de energia e que dentro desta os três maiores usos, por ordem decrescente, são os equipamentos de cozinha, o aquecimento de águas quentes sanitárias e o aquecimento ambiente, com percentagens de 39%, 23% e 22%, respetivamente (Figura 1.3).

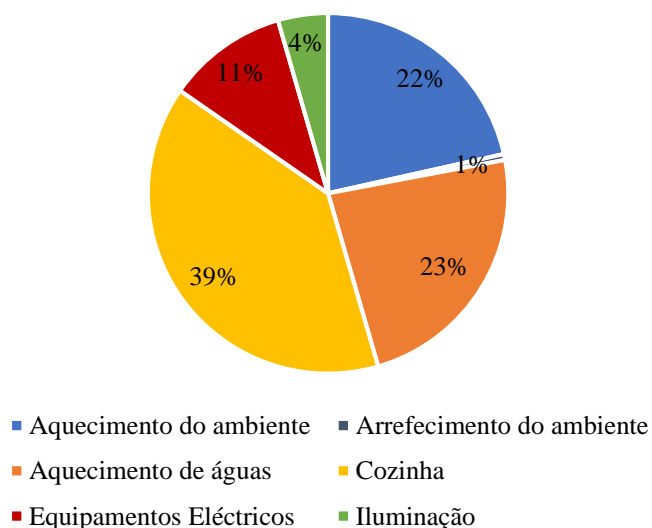


Figura 1.3 – Consumo de energia elétrica por tipo de utilização [2].

Com a elevada percentagem de consumo energético associada às habitações, o setor residencial começou a ser alvo de preocupações por parte do Estado português, tendo sido desenvolvidas medidas legislativas

e incentivos para controlar este consumo. No que diz respeito às medidas de código foram implementados o “Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios” (RCCTE), em 2010, e o “Sistema de Certificação dos Edifícios” (SCE), em 2013. O primeiro designa apenas os edifícios residenciais novos e existentes e o segundo os edifícios residenciais e não residenciais, novos e existentes [3][4]. Relativamente aos incentivos, foi criado em 2008 um plano de ação nacional de eficiência, o “Portugal Eficiente 2015”, em 2010 uma dedução de taxa para equipamentos eficientes e em 2012 um fundo de energia eficiente [5][6].

1.2. Estado de arte

O consumo excessivo de energia para aquecimento através de fontes não renováveis levou ao desenvolvimento de tecnologias que pudessem produzir a mesma quantidade de energia, utilizando fontes de energia renovável e com maior eficiência. Assim, surgiram os painéis solares térmicos, as bombas de calor e outras tecnologias. Apesar destes serem dois mecanismos de obtenção de calor de forma sustentável, o seu rendimento é extremamente afetado pelos fatores climáticos. Nas bombas de calor existe uma dependência da temperatura exterior, enquanto nos painéis solar térmicos a exposição solar é um fator dominante. De modo a colmatar as fragilidades destes dois sistemas surgem os sistemas solares termodinâmicos. Nestes existe um fluido refrigerante – R134a ou R407c – que circula em circuito fechado e entra no coletor solar sem cobertura, sofrendo a ação da chuva, do sol, da temperatura ambiente, do vento e de outros fatores externos. Neste processo o fluido ganha calor, que é depois transferido para um permutador, que aquece a água, através da ajuda de um compressor. O ciclo repete-se quando o fluido arrefece. As principais vantagens deste tipo de sistemas prendem-se com o facto de o fluido refrigerante apresentar uma temperatura de ebulição de aproximadamente -30°C , que permite o funcionamento do sistema durante a noite, e deste ser o mesmo fluido a circular na bomba, reduzindo o seu consumo de energia elétrica [7]. A desvantagem refere-se à utilização em simultâneo das duas componentes em situações em que a energia produzida pelo coletor solar sem cobertura é suficiente para responder às necessidades de aquecimento, pois evita a passagem de calor pela bomba de calor e o consumo de energia elétrica.

Na última década começaram a surgir sistemas híbridos de aquecimento ambiente e aquecimento de águas quentes sanitárias, divergindo dos anteriores no facto de estes conseguirem utilizar a bomba de calor e o coletor em simultâneo ou individualmente. Este crescente interesse tem vindo a despertar por parte da comunidade científica um aumento na investigação deste tipo de sistemas, existindo uma variedade de configurações para vários tipos de clima [7]. Esta variedade engloba os tipos de coletor solar, as aplicações para o calor produzido pelo coletor, as fontes de calor usadas para a bomba de calor, o tipo de refrigerante da bomba de calor, o tipo de armazenamento, a fonte de recurso, no caso da bomba, coletor e depósito não conseguir suprir as necessidades, o tipo de clima onde o sistema se insere, a carga necessária a produzir pelo sistema, entre outros. Deste modo, Frank et al. [8] resumizou alguns estudos já realizados para este tipo de sistemas numa tabela, propondo três métodos de classificação e análise: (1) visualização esquemática com representação dos fluxos de calor, (2) esquema de notação através de combinação de letras e (3) notação simplificada da interação entre o coletor e a bomba de calor.

Para a visualização esquemática os sistemas foram dimensionados para as necessidades de aquecimento ambiente e de aquecimento de águas quentes sanitárias e como resultado desta análise a diferentes tipos de sistemas híbridos são consideradas cinco componentes importantes: coletores solares, bombas de calor, fonte de recurso e armazenamento de carga no lado frio da bomba de calor ou armazenamento de carga no lado quente da bomba. Através destas cinco componentes foi criado um gráfico representativo do sistema de calor, como se pode observar na Figura 1.4.

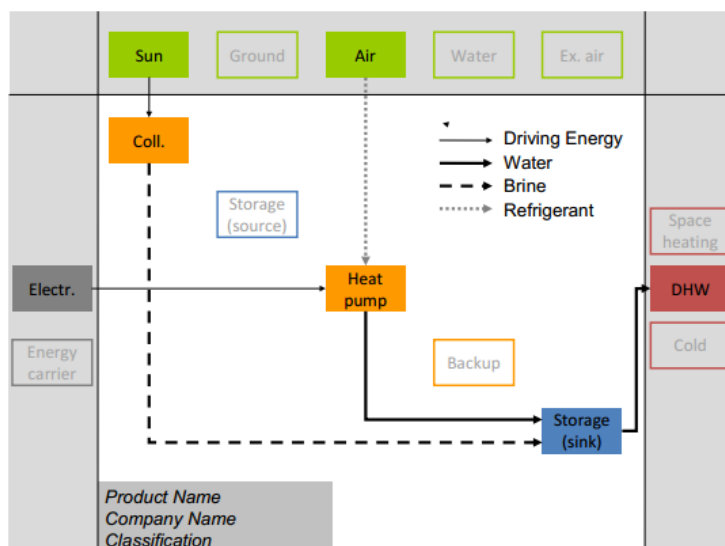


Figura 1.4 – Exemplo introdutório da visualização do esquema (adaptado de Frank et al.) [8].

Representado com a cor cinzento encontra-se o fluxo de energia final, a verde a energia do ambiente, a vermelho a energia útil, a laranja os conversores de energia e a azul os armazenamentos.

No esquema de notação através de combinação de letras foi criado um esquema de abreviaturas com a designação de SHP (S para o coletor e HP para a bomba de calor), em que são definidos as fontes (*source*) e os reservatórios (*sink*) para as duas tecnologias, representado na Figura 1.5.

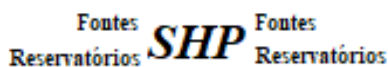


Figura 1.5 – Esquema de notação [8].

Para o terceiro método, a interação entre o coletor solar e a bomba de calor foram distinguidas em três tipos de combinação: paralelo, série e regeneração. Na primeira, o coletor solar e a bomba de calor fornecem energia útil através do carregamento de um ou mais reservatórios de calor. Na combinação em série o coletor atua como fonte de calor da bomba, primária ou complementar, diretamente ou através de armazenamento. Na regeneração o coletor é utilizado para a regeneração de outra fonte, geralmente o solo [8].

Devido às diversas configurações existentes diferentes valores de fatores de desempenho sazonal são indicados por vários autores [9]. Porém, alguns não fazem referência ao modo como este é calculado ou calculam-no de formas diferentes, não podendo fazer uma comparação para sistemas inseridos no mesmo clima, com a mesma configuração nem com a mesma necessidade. Assim, o fator de desempenho sazonal pode ser calculado das seguintes formas:

- Considerando apenas a bomba de calor (SPF1);
- Considerando a bomba de calor e a eletricidade auxiliar utilizada (SPF2);
- Considerando todo o sistema (SPF3);
- Considerando todo o sistema e a eletricidade auxiliar utilizada (SPF4) [10].

$$SPF1 = \frac{Q_{HP}}{E_{HP}} \quad (1.1)$$

$$SPF2 = \frac{Q_{HP}}{E_{HP} + E_{Hsc\ aux}} \quad (1.2)$$

$$SPF3 = \frac{Q_{building}}{E_{HP} + E_{Hsc\ aux} + E_{Backup}} \quad (1.3)$$

$$SPF4 = \frac{Q_{building}}{E_{HP} + E_{Hsc\ aux} + E_{Backup} + E_{Dist\ aux}} \quad (1.4)$$

em que Q_{HP} e $Q_{building}$ representam a energia produzida pela bomba de calor e a energia necessária para aquecimento de AQS e AA, respetivamente. E_{HP} , $E_{Hsc\ aux}$, E_{Backup} e $E_{Dist\ aux}$ representam o consumo de energia elétrica por parte da bomba de calor, do calor que circula na bomba para os depósitos, da energia auxiliar e do calor que circula na bomba para responder às necessidades do edifício, respetivamente. Todas as variáveis encontram-se expressas em kWh.

1.3. Objetivos e Estrutura

A presente dissertação tem como objetivo o cálculo do fator de desempenho sazonal (SPF_{sys}) de um sistema para aquecimento ambiente e águas quentes sanitárias de um edifício multi-familiar localizado em Lisboa e Viseu.

Para o cálculo do SPF_{sys} , procedeu-se à implementação do sistema em *MATLAB* com base na implementação feita por Fraga C. [10] para a cidade de Genebra, Suíça. Implementado o modelo recorreu-se aos programas *Sketchup* e *EnergyPlus* com o objetivo de calcular as necessidades de aquecimento do edifício em estudo. Os resultados obtidos referentes às necessidades de aquecimento do edifício foram simulados em *MATLAB* de modo a caracterizar a resposta do sistema para os climas de Lisboa e Viseu.

Este documento encontra-se estruturado da seguinte forma:

No capítulo 2 encontra-se descrito o sistema implementado nesta dissertação, bem como a caracterização dos componentes que o constituem e as respetivas regras de funcionamento.

O capítulo 3 demonstra a validação deste modelo tendo em conta três conjuntos de dados: monitorizados, simulados em *TRNSYS* e simulados em *MATLAB*. Os resultados obtidos pela simulação recorrendo ao programa *MATLAB* são comparados a uma escala mensal para os valores monitorizados e simulados em *TRNSYS* por Fraga C.[10], sendo esta comparação dividida em quatro categorias: Entrada, Saída, Depósito e Desempenho.

No capítulo 4 é apresentado o edifício em estudo, sendo caracterizada a sua envolvente opaca, os vãos envidraçados, o tipo de ocupação, as cargas elétricas correspondentes à iluminação e aos equipamentos elétricos, o clima no qual o edifício se insere, a infiltração e as necessidades de aquecimento de águas quentes sanitárias e aquecimento ambiente.

O capítulo 5 apresenta os resultados obtidos pela simulação, recorrendo ao programa *MATLAB*, para o edifício em estudo para os climas de Lisboa e Viseu, tendo em conta as seguintes variantes: necessidades de aquecimento ambiente, temperatura limite do evaporador da bomba de calor e área do coletor solar.

No capítulo 6 conclui-se acerca do SPF obtido para o sistema para os climas de Lisboa e Viseu e avalia-se a sensibilidade deste parâmetro às variações descritas no capítulo 5.

2. Sistema

O modelo numérico elaborado para a realização deste tema de dissertação baseia-se na tese de doutoramento de Fraga C. [10]. O mesmo provém da monitorização prolongada de um sistema de produção de aquecimento real, implementado num edifício com uma área aquecida de 927 m², um total de 32 habitantes e com elevado isolamento térmico, situado na cidade de Genebra, Suíça.

Entre novembro de 2011 e outubro de 2013 foram realizadas medições utilizando sensores de temperatura, medidores de fluxo e de eletricidade, com o objetivo de quantificar os diferentes fluxos de energia do sistema: produção solar (direta e para o evaporador), armazenamento de calor (carga e descarga), consumo elétrico (circuito solar, bomba de calor e resistência elétrica), produção da bomba de calor e necessidades para aquecimento ambiente (AA) e águas quentes sanitárias (AQS). Estes dados foram posteriormente quantificados recorrendo à simulação do modelo em *TRNSYS*.

O sistema consiste numa bomba de calor diretamente acoplada a um conjunto de coletores solares sem vidro, que podem funcionar como produtores diretos de energia solar ou absorsores para a bomba de calor (evaporador), possuindo uma ligação direta com a bomba sem armazenamento intermédio. O calor produzido por produção direta de calor pelos coletores ou por produção da bomba é usado para responder às necessidades de aquecimento de AQS ou de AA, dando prioridade ao AQS, uma vez que o calor produzido em excesso é armazenado nos depósitos centrais. Este sistema não permite o aquecimento prévio dos depósitos por parte do coletor solar [10].

2.1. Caracterização dos componentes

Uma vez conhecidos os principais componentes do sistema é de extrema importância proceder à sua caracterização. Todos os componentes presentes no sistema são modelados de acordo com o balanço de energia.

2.1.1. Coletor solar

O coletor solar utilizado neste modelo consiste num coletor solar sem vidro, com um elevado desempenho. Esta característica deve-se ao facto do mesmo apresentar uma emissividade de 0,2 e a sua geometria de absorção apresentar uma configuração em forma de almofada.

Para o sistema, os coletores seleccionados funcionam como coletores solares ou como absorsores de calor no ar ambiente, não sendo possível descrevê-los considerando apenas a sua curva de eficiência. Assim, as trocas de energia por parte do coletor são caracterizadas seguindo o modelo de balanço de calor instantâneo, apresentado na equação (2.1):

$$Q_{sol} = \eta_0 \times G_i + Q_{IR} - (h_0 + h_v \times v)(T_{sol} - T_{ext}) - \frac{C_{sol}}{dt} \times \Delta T_{sol} \quad (2.1)$$

em que $\eta_0 = 0,917 \pm 0,016$ e $C_{sol} = 9,46 \pm 0,59 \text{ Wh/(m}^2\text{.K)}$. $h_0 = 10,47 \pm 0,52 \text{ W/(m}^2\text{.K)}$ e representa o coeficiente de perdas do coletor solar, sem ação do vento, $h_v = 2,37 \pm 0,22 \text{ W/(m}^2\text{.K)}$ por (m/s) e representa o coeficiente de perdas do coletor solar, proporcional à velocidade do vento, e v representa a velocidade do vento, em m/s.

O modelo de balanço de calor instantâneo relaciona a produção de calor solar (Q_{sol}) com:

- A absorção de irradiação global solar no plano do coletor (G_i), em função de uma eficiência ótica (η_0);
- O balanço da radiação infravermelha do coletor (Q_{IR});
- Os ganhos ou perdas por convecção, descritos em função de duas variantes: a diferença de temperaturas entre a temperatura do coletor (T_{sol}) e a temperatura exterior (T_{ext}) e o coeficiente de trocas por convecção, que é dado em função da velocidade do vento;
- O aumento da temperatura do coletor solar (ΔT_{sol}) em relação à capacidade de calor do coletor (C_{sol}) durante um intervalo de tempo (dt).

O coletor escolhido para o sistema não apresenta superfície traseira isolada, permitindo-lhe, na ausência de radiação solar, promover as trocas de calor com o ar, absorvendo a sua energia. Deste modo, o balanço da radiação infravermelha tem em conta dois fatores:

- A face do coletor voltada para o céu apresenta uma radiação incidente IR e uma radiação de saída à temperatura do coletor solar;
- A face do coletor voltada para a cobertura apresenta uma radiação incidente à temperatura exterior e uma radiação de saída à temperatura de coletor solar.

Assim, apresentando o coletor uma emissividade de 0,2 (ε), Q_{IR} é calculado através da seguinte equação:

$$Q_{IR} = \varepsilon (IR + \sigma(T_{ext}^4 - 2 T_{sol}^4)) \quad (2.2)$$

2.1.2. Bomba de calor

A bomba de calor utilizada para o sistema possui uma saída térmica de 35 kW_{th} e um COP de 4,5 quando o evaporador possui uma temperatura de entrada de 0°C sobre uma temperatura de saída do condensador de 35°C. A mesma possui um líquido circulante R407C e é modelada de acordo com a tabela cedida pelo fabricante, onde encontram-se definidos os valores da energia produzida e consumida por parte da bomba em função da temperatura do evaporador e do condensador (Figura 8.1 e Figura 8.2). A temperatura do evaporador é obtida através do coletor solar, que apresenta um valor máximo de temperatura de operação de 20°C, e a temperatura do condensador é obtida através das necessidades de aquecimento de AQS ou de AA, limitada a um valor de temperatura mínimo de operação de 30°C. A bomba de calor possui uma temperatura limite do evaporador de -15°C.

A energia produzida pelo evaporador, o coeficiente de performance da bomba de calor, a energia consumida e a energia produzida pela bomba são determinadas através das equações seguintes:

$$\dot{Q}_{evap} = \dot{Q}_{hp} - \dot{E}_{hp} \quad (2.3)$$

$$COP = \frac{\dot{Q}_{hp}}{\dot{E}_{hp}} \quad (2.4)$$

$$\dot{Q}_{hp} = f(T_{cond}, T_{evap}) \quad (2.5)$$

$$\dot{E}_{hp} = f(T_{cond}, T_{evap}) \quad (2.6)$$

2.1.3. Armazenamento

O armazenamento horário de calor é caracterizado por um modelo simplificado de um nó, não considerando a estratificação. Assim, a diferença entre a carga total de armazenamento e a descarga (ΔQ_{st}) é descrita em função dos seguintes parâmetros:

- o aumento da temperatura do armazenamento (ΔT_{st}) durante o intervalo de tempo dt (1 h), em relação à sua capacidade calorífica total (C_{st});
- perda térmica, que é impulsionada pela diferença de temperaturas entre a temperatura de armazenamento (T_{st}) e a temperatura da sala onde se encontra o depósito (T_0) e por um coeficiente de perdas de calor total (H_{st}).

A equação que relaciona todos os parâmetros anteriores é descrita em seguida:

$$\Delta Q_{st} = C_{st} \times \Delta T_{st} + H_{st} \times (T_{st} - T_0) \times dt \quad (2.7)$$

em que C_{st} toma o valor de $5,36 \pm 0,19$ kWh/K e H_{st} toma o valor de $22,7 \pm 2,4$ W/K.

O sistema é constituído por dois depósitos centrais – um de água quente e outro de água tépida –, possuindo cada um uma capacidade de armazenamento de 3000 litros. Devido ao fato deste sistema apresentar uma distribuição hidráulica comum para dar resposta às necessidades de aquecimento de AQS e de AA, cada apartamento contém um depósito adicional de 300 litros para responder às necessidades de AQS.

2.2. Propriedades

O funcionamento do sistema rege-se por três regras fundamentais, estando estas presentes em todas as decisões de controlo do sistema:

- responder às necessidades de aquecimento de águas quentes sanitárias e de aquecimento ambiente de modo alternado, dando prioridade ao aquecimento de águas quentes sanitárias;
- em caso de armazenamento de energia esta deve ser primeiramente armazenada no depósito quente, face ao depósito tépido, caso a temperatura de saída do coletor solar ou da bomba de calor seja superior à temperatura do depósito quente;
- em caso de descarga esta é feita recorrendo primeiro ao depósito de água tépida, desde que a temperatura do depósito de água tépida seja igual ou superior à temperatura pretendida para aquecimento.

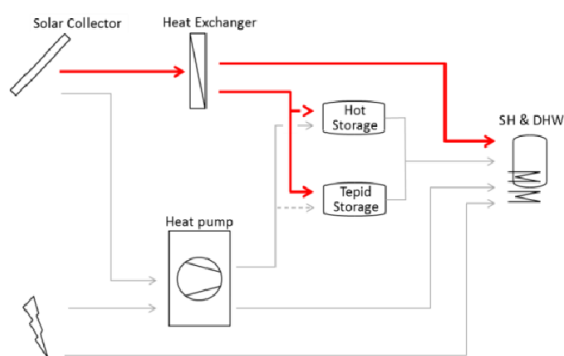
Tendo em conta as três regras fundamentais, o sistema opera segundo a seguinte ordem como ilustra a Figura 2.1:

- 1) Produção direta de calor solar para as necessidades de aquecimento de águas quentes sanitárias e de aquecimento ambiente, sempre que a produção de calor solar seja a temperatura superior

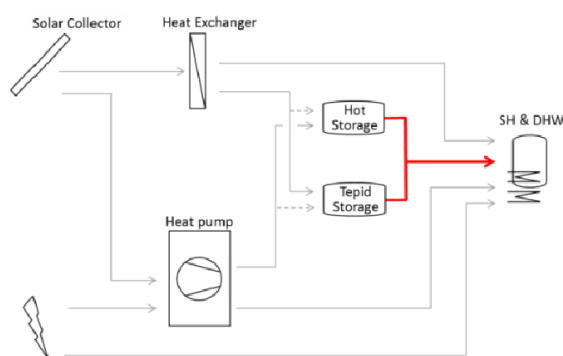
ou igual à necessidade de aquecimento. Em caso de excesso de energia produzida esta é armazenada nos depósitos de água centrais;

- 2) Caso a produção de calor solar seja a temperatura inferior às necessidades de aquecimento recorre-se aos depósitos de água centrais sempre que estes possuam uma temperatura de armazenamento igual ou superior à temperatura da necessidade de aquecimento;
- 3) Acionamento da bomba de calor caso a temperatura do depósito central seja inferior à temperatura necessária para aquecimento. Em caso de excesso de produção de energia por parte da bomba de calor esta é armazenada no depósito central;
- 4) Caso a temperatura do evaporador da bomba seja menor que -15°C ou a energia produzida pela bomba seja insuficiente, recorre-se a uma resistência elétrica que produz energia na proporção um para um, ou seja, a produção da resistência elétrica é igual ao seu consumo.

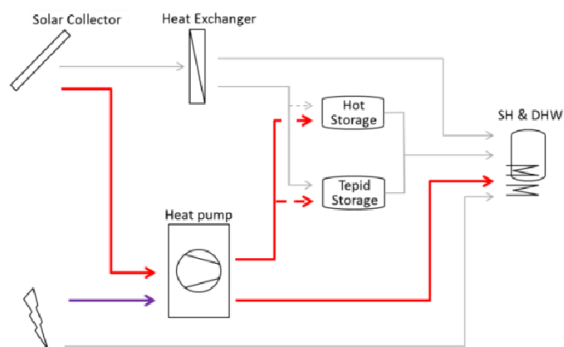
1) Produção solar



2) Descarga depósito



3) Bomba de Calor



4) Eletricidade

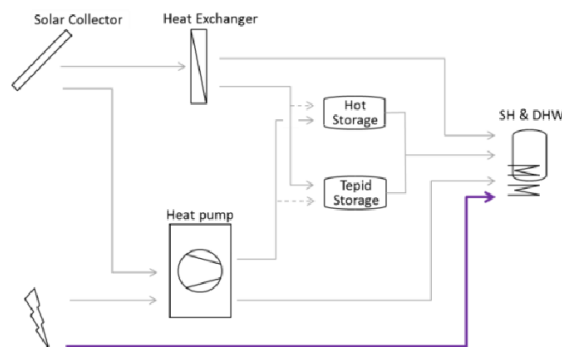


Figura 2.1 – Modos de funcionamento do sistema (adaptado de Fraga C.[10]).

3. Validação do Modelo

Estando definidas as características dos componentes e das propriedades do sistema procedeu-se à implementação do modelo numérico em *MATLAB*.

Assim, de modo a ser possível a comparação dos valores monitorizados e simulados em *TRNSYS* por Fraga C. [10] foi importante dividir o sistema em quatro categorias de parâmetros: **Entrada**, **Saída**, **Depósito** e **Desempenho** (Figura 3.1).

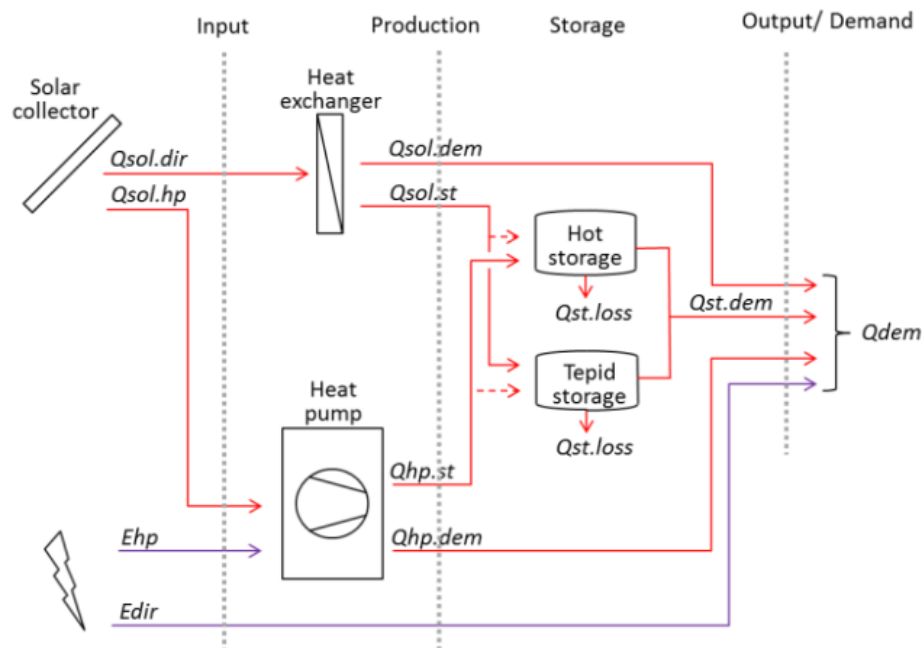


Figura 3.1 – Fluxos de energia do sistema [10].

Relativamente à **Entrada** é importante caracterizar a produção direta solar para AQS, AA e para os depósitos ($Q_{sol,dir}$), a energia produzida pelo coletor que é fornecida à bomba de calor ($Q_{sol,hp}$), a energia elétrica consumida pela bomba (E_{hp}) e a energia elétrica da resistência elétrica, (E_{dir}).

Para a **Saída** são caracterizadas quatro variantes: produção direta solar para AQS e AA ($Q_{sol,dem}$), energia produzida pela bomba para responder às necessidades de aquecimento de AQS e AA ($Q_{hp,dem}$), calor fornecido por parte dos depósitos para responder às necessidades de aquecimento de AQS e AA ($Q_{st,dem}$) e a energia elétrica da resistência elétrica, (E_{dir}).

Na categoria **Depósito** são definidas quatro variantes: produção direta solar de calor, que é armazenada nos depósitos ($Q_{sol,st}$), energia produzida pela bomba de calor, que é armazenada nos depósitos ($Q_{hp,st}$), calor fornecido por parte dos depósitos para responder às necessidades de aquecimento de AQS e AA ($Q_{st,dem}$) e energia perdida por parte dos depósitos ($Q_{st,loss}$).

Relativamente ao **Desempenho** são definidos dois indicadores: fator de desempenho sazonal da bomba (SPF_{hp}) e fator de desempenho sazonal do sistema (SPF_{sys}). Estes indicadores são calculados através das seguintes equações:

$$SPF_{hp} = \frac{\int \dot{Q}_{hp}}{\int \dot{E}_{hp}} = \frac{Q_{hp}}{E_{hp}} \quad (3.1)$$

$$SPF_{sis} = \frac{\int \dot{Q}_{dem}}{\int \dot{E}_{hp} + \dot{E}_{dir}} = \frac{Q_{dem}}{E_{hp} + E_{dir}} \quad (3.2)$$

em que Q_{hp} representa a energia produzida pelo evaporador da bomba de calor, E_{hp} a energia elétrica consumida pela bomba de calor, Q_{dem} as necessidades de aquecimento de AE e AQS do edifício em estudo e E_{dir} a energia produzida pela resistência elétrica.

Estando identificado as quatro categorias de comparação, foram realizadas duas comparações de análise de energia: valores monitorizados com os valores obtidos em *MATLAB* e os valores simulados em *TRNSYS* com os valores obtidos em *MATLAB*.

Calculou-se o erro do modelo para os valores monitorizados em comparação com os valores obtidos em *MATLAB* (Monitorizado - *MATLAB*) e para os valores simulados em *TRNSYS* em comparação com os valores obtidos em *MATLAB* (*TRNSYS* - *MATLAB*) recorrendo-se à seguinte equação:

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^j M_i - S_i}{\sum_{i=1}^j M_i} \quad (3.3)$$

em que M_i corresponde aos valores monitorizados e em *TRNSYS* e S_i aos valores obtidos pela simulação recorrendo ao programa *MATLAB* [11].

Os resultados obtidos para os valores Monitorizados, para a simulação em *TRNSYS* e em *MATLAB*, encontram-se ilustrados na seguinte tabela para o período de um ano, bem como o erro associado entre os valores obtidos (Monitorizado - *MATLAB*) e (*TRNSYS* - *MATLAB*).

Tabela 3.1– Resultados obtidos para os valores monitorizados, para a simulação em *TRNSYS* e em *MATLAB*, e o erro associado entre os valores obtidos (monitorizados - *MATLAB*) e (*TRNSYS* - *MATLAB*).

		Erro [%]				
		Monitorizado	TRNSYS	MATLAB	Monitorizado-MATLAB	TRNSYS-MATLAB
Entrada [kWh/(m ² .ano)]	Q_{sol,dir}	14,56	12,65	12,16	16,49	3,88
	Q_{sol,hp}	37,68	38,92	39,55	-4,95	-1,61
	E_{hp}	22,08	17,65	17,83	19,25	-1,02
	E_{dir}	0,94	4,02	3,76	-299,85	6,50
Saída [kWh/(m ² .ano)]	Q_{sol,dem}	5,94	5,57	5,42	8,71	2,65
	Q_{hp,dem}	38,97	32,31	32,23	17,30	0,26
	Q_{st,dem}	23,27	26,39	26,88	-15,51	-1,86
	E_{dir}	0,94	4,02	3,76	-299,85	6,50
Armazenamento [kWh/(m ² .ano)]	Q_{sol,st}	8,62	7,08	6,74	21,85	4,86
	Q_{hp,st}	21,11	24,26	25,15	-19,13	-3,66
	Q_{st,dem}	23,27	26,39	26,88	-15,51	-1,86
	Q_{st,loss}	4,42	4,94	5,02	-13,55	-1,60
Desempenho	SPF_{hp}	2,70	3,20	3,22	-19,19	-0,56
	SPF_{sys}	3,00	3,15	3,16	-5,40	-0,38

Carga [kWh/(m ² .ano)]	Q _{AQS}	47,66	47,66	47,66	0,00	0,00
	Q _{AA}	20,63	20,63	20,63	0,00	0,00
	Q _{total}	68,29	68,29	68,29	0,00	0,00

Observando a Tabela 3.1 verifica-se que os erros obtidos entre os valores Monitorizado-*MATLAB* apresentam uma percentagem de erro elevada. Variáveis como $Q_{sol,dir}$, E_{hp} , $Q_{hp,dem}$, $Q_{st,dem}$, $Q_{sol,st}$, $Q_{hp,st}$ e SPF_{hp} apresentam um erro superior a 15%, sendo a maior discrepância obtida na variável E_{dir} , que apresenta um erro de cerca de 300%.

Verifica-se ainda que os erros associados aos valores *TRNSYS-MATLAB* apresentam um baixo valor, sendo o valor máximo de erro igual a 6,5%, correspondente à variável E_{dir} .

Relativamente à percentagem de erro ser negativa ou positiva, o sinal negativo indica que os valores obtidos em *MATLAB* são superiores face aos valores obtidos em Monitorizados e em *TRNSYS*.

Assim, para se confirmar a validação e de modo a entender as principais diferenças entre os valores obtidos na Tabela 3.1, recorreu-se a uma análise do perfil mensal para as categorias **Entrada**, **Saída** e **Depósito** durante um ano para os valores obtidos entre Monitorizado - *MATLAB* e *TRNSYS* - *MATLAB*.

3.1. Monitorizado - *MATLAB*

De modo a compreender as discrepâncias de valores obtidos na Tabela 3.1 procedeu-se à representação do perfil mensal dos valores Monitorizados e em *MATLAB*, obtidos para as três diferentes categorias.

Para a categoria **Entrada** foram obtidos os seguintes resultados:

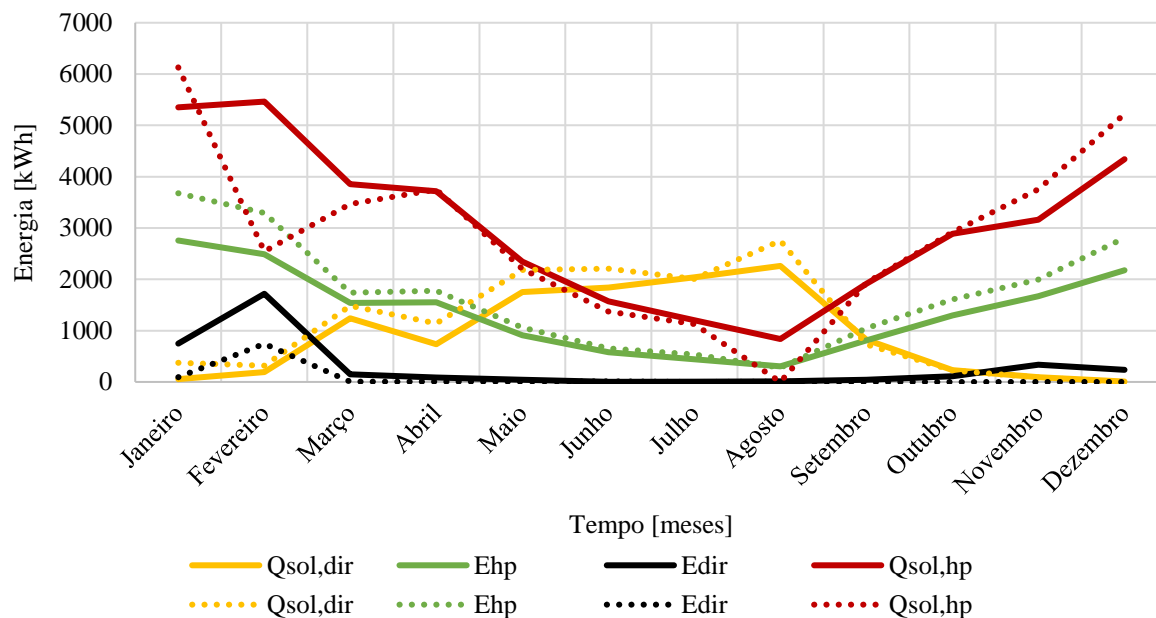


Figura 3.2 – Representação gráfica dos resultados obtidos após simulação em *MATLAB* para a categoria Entrada. As linhas a tracejado representam os valores medidos por Fraga C.[10] e as linhas a cheio os valores simulados em *MATLAB*.

Observando a Figura 3.2 verifica-se que o modelo em *MATLAB* à escala mensal apresenta resultados semelhantes aos valores medidos para as quatro variantes. Os meses de janeiro e fevereiro são os que

apresentam resultados com um maior erro associado para as variáveis E_{hp} , E_{dir} e $Q_{sol, hp}$. Para E_{hp} , os valores medidos são superiores aos valores simulados em *MATLAB* devido ao facto de a bomba de calor ser insuficiente para suprir as necessidades de AQS e AA, quer por a temperatura do evaporador ser inferior a -15°C ou por a produção ser insuficiente. Esta insuficiência é garantida pela resistência elétrica, que faz com que os valores de E_{dir} simulados sejam superiores aos valores Monitorizados e que ocorra um pico de produção significativo nos primeiros. Por último verifica-se que a energia produzida pela componente solar, que tem como destino a bomba de calor, para os primeiros meses do ano é superior para os valores obtidos em *MATLAB* face aos valores Monitorizados.

Para a categoria **Saída** foram obtidos os seguintes resultados:

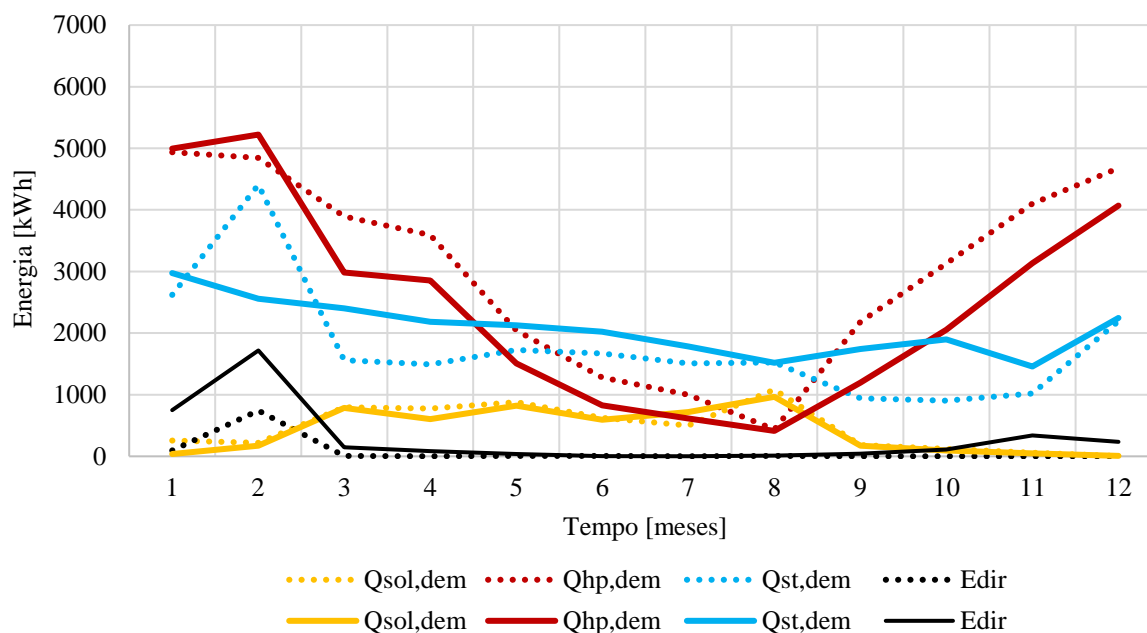


Figura 3.3 – Representação gráfica dos resultados obtidos após simulação em *MATLAB* para a Saída. As linhas a tracejado representam os valores medidos por Fraga C.[10] e as linhas a cheio os valores simulados em *MATLAB*.

Pela Figura 3.3 verifica-se que os valores obtidos para uma base mensal de $Q_{sol, dem}$ e $Q_{hp, dem}$ possuem um comportamento bastante próximo dos valores medidos, sendo que os valores obtidos pelo *MATLAB* para $Q_{hp, dem}$ apresentam um menor valor a partir do mês de fevereiro como se constata pela figura.

Observando a Tabela 3.1 e a Figura 3.3 verifica-se que, para o comportamento $Q_{st, dem}$ obtido em *MATLAB*, os valores de descarga por parte do depósito são superiores face a $Q_{st, dem}$ Monitorizado, exceto para janeiro e fevereiro. Para $Q_{hp, dem}$ Monitorizado verifica-se o contrário, que a produção por parte da bomba é muito superior aos valores simulados para todos os meses do ano, exceto janeiro e fevereiro. Observando os meses janeiro, fevereiro, março, abril, outubro novembro e dezembro verifica-se, para os valores *MATLAB*, que a maior parte do calor produzido provém da bomba de calor ($Q_{hp, dem}$). Para os restantes meses do ano a maior parcela do calor produzido provém do depósito ($Q_{st, dem}$).

Para a categoria **Depósito** foram obtidos os seguintes resultados:

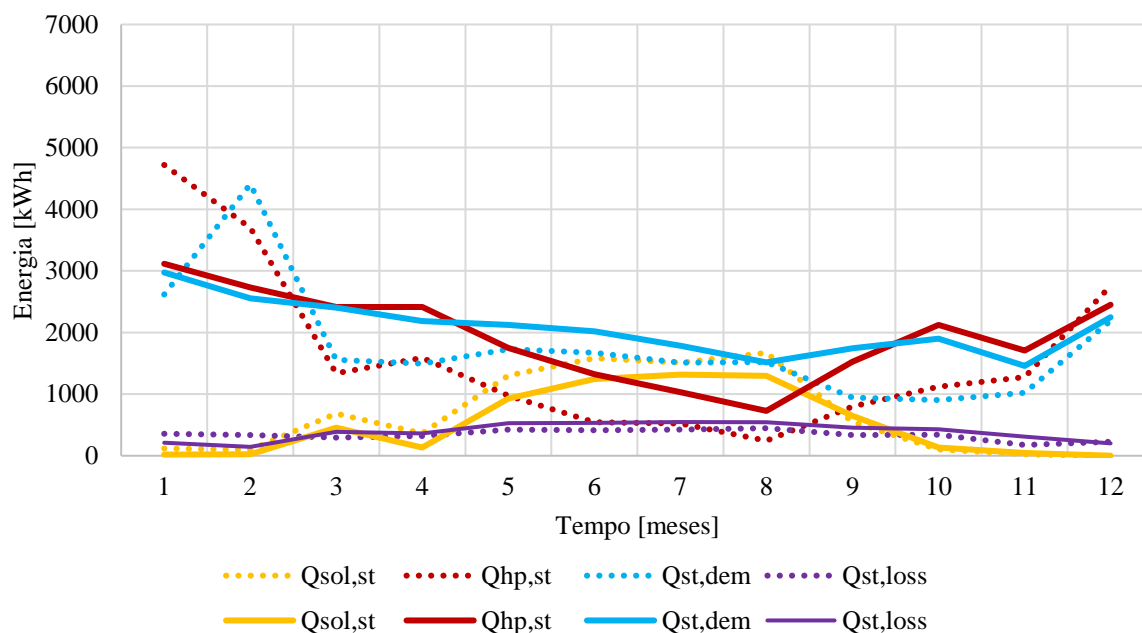


Figura 3.4 – Representação gráfica dos resultados obtidos após simulação em *MATLAB* para a categoria Depósito. As linhas a tracejado representam os valores medidos por Fraga C. [10] e as linhas a cheio os valores simulados em *MATLAB*.

Observando a Figura 3.4 verifica-se que $Q_{sol,st}$ e $Q_{st,loss}$ encontram-se bem representados, sendo o comportamento dos valores simulados bastante semelhante aos valores Monitorizados. Verifica-se ainda que, exceto para os meses janeiro e fevereiro, o contributo por parte da bomba de calor para o ganho de energia no depósito ($Q_{hp,st}$) é bastante superior para os valores simulados face aos monitorizados, resultando numa maior quantidade de energia armazenada no depósito. Este facto realça a discrepância de valores de $Q_{st,dem}$ monitorizado e simulado, pois o maior contributo por parte da bomba de calor para o ganho de energia no depósito para os valores simulados promove um maior uso de energia por parte do depósito para os valores simulados, de modo a colmatar as necessidades de aquecimento.

3.2. *TRNSYS* - *MATLAB*

Relativamente aos resultados obtidos pelas simulações em *TRNSYS* e em *MATLAB*, os valores obtidos por estas encontram-se representados à escala mensal durante um ano para as três categorias de estudo:

Para a categoria **Entrada** foram obtidos os seguintes resultados:

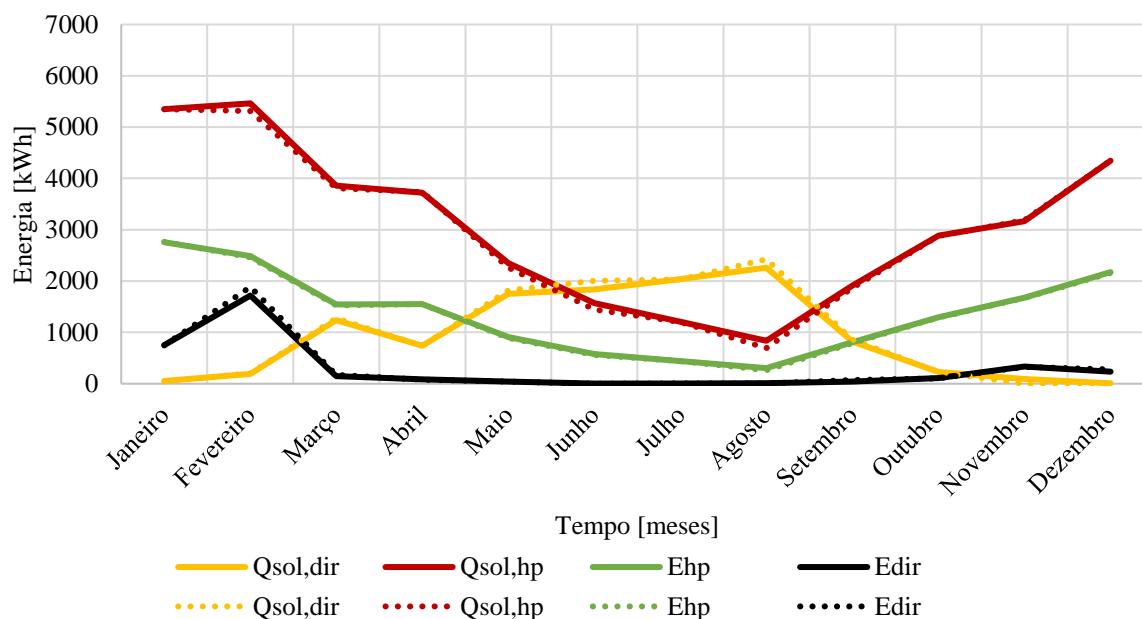


Figura 3.5 – Representação gráfica dos resultados obtidos após simulação em *MATLAB* para a Entrada. As linhas a tracejado representam os valores simulados por Fraga C. [10] em *TRNSYS* e as linhas a cheio os valores simulados em *MATLAB*.

Observando a Figura 3.5 verifica-se que os valores obtidos para as variáveis em estudo encontram-se bem representados à escala mensal. Observando a Tabela 3.1 verifica-se que o maior erro corresponde à variável E_{dir} apresenta um valor de 6,5%. Contudo, observando a figura, constata-se que este erro deve-se ao facto de no mês de fevereiro os valores correspondentes a *TRNSYS* possuírem um maior valor face aos resultados obtidos em *MATLAB*, sendo que para o resto do ano os valores de E_{dir} encontram-se bem representados.

Para a categoria **Saída** foram obtidos os seguintes resultados:

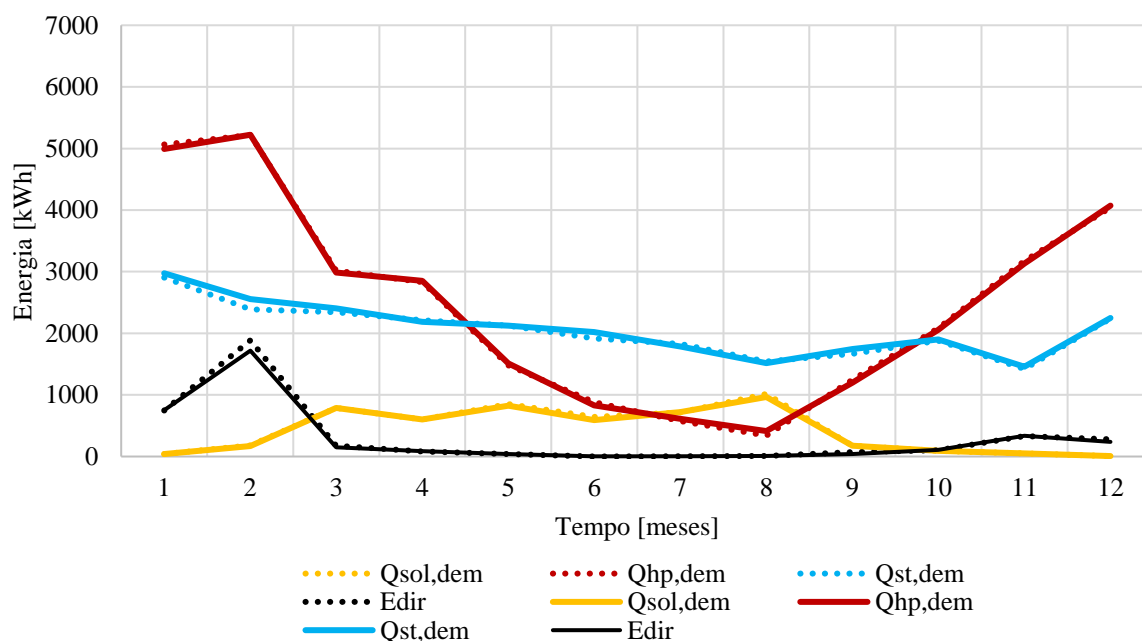


Figura 3.6 – Representação gráfica dos resultados obtidos após simulação em *MATLAB* para a Saída. As linhas a tracejado representam os valores simulados por Fraga C. [10] em *TRNSYS* e as linhas a cheio os valores simulados em *MATLAB*.

Observando a Figura 3.6 verifica-se que, para o perfil mensal para um ano, os valores obtidos pela simulação encontram-se bem simulados, obtendo um comportamento e um valor muito semelhante (Tabela 3.1) ao obtido por Fraga C. [10] em *TRNSYS*.

Para a categoria **Depósito** foram obtidos os seguintes resultados:

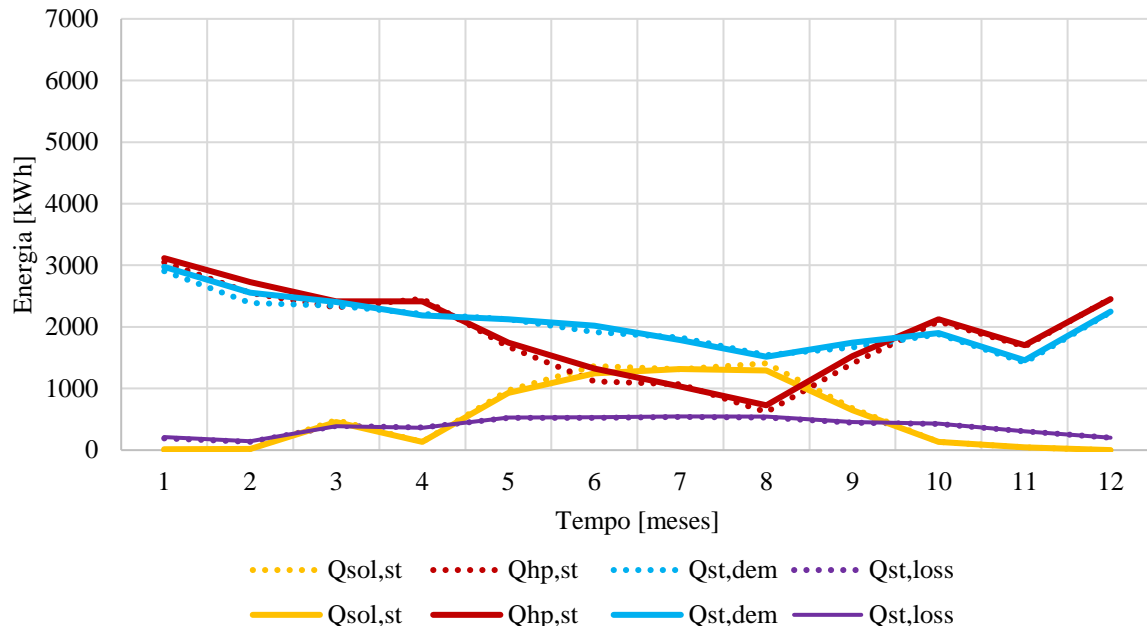


Figura 3.7 – Representação gráfica dos resultados obtidos após simulação em *MATLAB* para o Depósito. As linhas a tracejado representam os valores simulados por Fraga C.[10] em *TRNSYS* e as linhas a cheio os valores simulados em *MATLAB*.

Analisando a Figura 3.7 verifica-se uma vez mais a concordância de perfis obtidos em *MATLAB* face aos valores obtidos em *TRNSYS*. Contudo, observando a Tabela 3.1 e a Figura 3.7, verifica-se que as variáveis $Q_{hp,st}$ e $Q_{st,dem}$ apresentam valores simulados superiores em *MATLAB*. Este fenómeno é explicável pela iteração usada em *MATLAB* para calcular a temperatura de coletor que é cedida ao evaporador da bomba. Nesta é usada uma convergência por defeito, em que para o caso de a temperatura obtida para o evaporador estar compreendida entre metade do valor do intervalo de escala das temperaturas do evaporador presentes na tabela do fabricante de bomba (Anexo 8.1 e 8.2), esta opte pelo menor valor de temperatura de evaporador. Deste modo, optando por uma temperatura de evaporador menor, obtém-se uma maior produção de energia por parte da bomba de calor, que se irá refletir num maior valor de energia produzida pela bomba. Este excedente de produção irá transitar para o depósito, fazendo com que o depósito possua uma maior quantidade de energia armazenada e que, consequentemente, a energia que se poderá extrair do depósito para responder às necessidades de aquecimento irá ser maior.

Tendo em conta a Tabela 3.1 e a análise das figuras de comportamento mensal para o período de um ano para os resultados obtidos na Monitorização, *TRNSYS* e em *MATLAB*, verifica-se que os resultados obtidos em *MATLAB* e *TRNSYS* são muito semelhantes. Como as discrepâncias entre modelo e monitorização são explicadas em [10], conclui-se que o modelo implementado em *MATLAB* encontra-se validado.

4. Caso de estudo

4.1. Edifício

Uma vez implementado o sistema em *MATLAB* procedeu-se à escolha do edifício como caso de estudo. Deste modo, foi selecionado um edifício que integra um conjunto de edifícios dispostos em banda e apresenta a fachada principal orientada a sul (Figura 4.1), a posterior orientada a norte (Figura 4.2) e as fachadas laterais em contacto com edifícios adjacentes de construção semelhante.



Figura 4.1 – Fachada principal do edifício utilizado no caso de estudo [12].



Figura 4.2 – Fachada posterior do edifício utilizado no caso de estudo [12].

O caso de estudo é constituído por uma garagem coletiva e quatro pisos. O primeiro piso, que corresponde ao rés-do-chão, é constituído por dois apartamentos de tipologia T3 (Anexo 8.3), enquanto os restantes pisos são constituídos por três apartamentos, dois de tipologia T2 e um de tipologia T3 (Anexo 8.4) [12]. O edifício em estudo apresenta assim onze frações autónomas distintas na sua totalidade e uma área útil total de aquecimento de 772 m². A Figura 4.3 representa a implementação do caso de estudo em *SketchUp*.

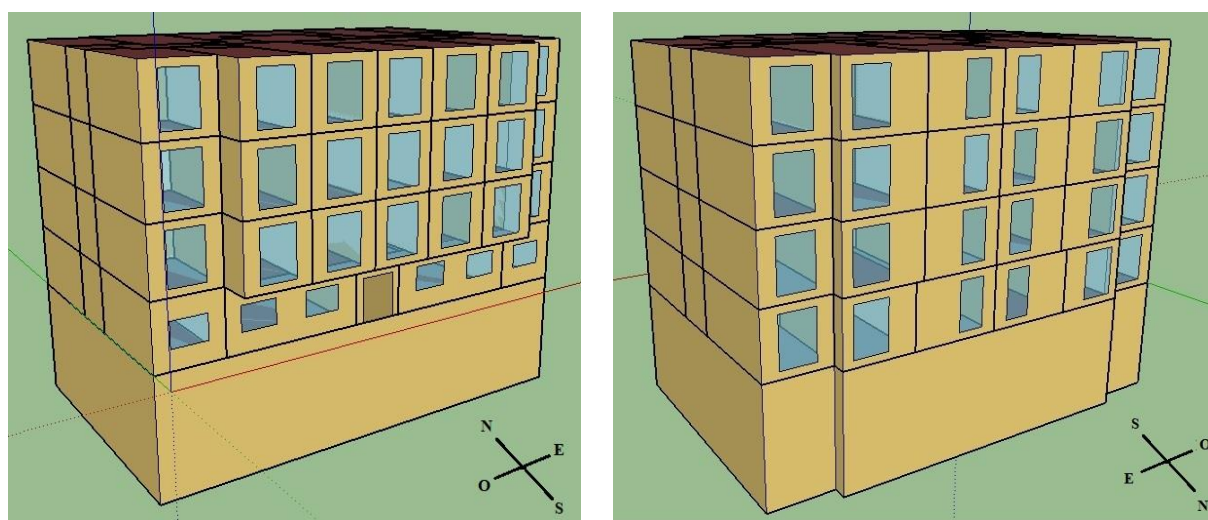





Figura 4.3 – Representação do caso de estudo em *SketchUp*.

4.2. Envolvente opaca

Os materiais utilizados nas soluções construtivas opacas do edifício e as respetivas propriedades encontram-se na tabela seguinte:

Tabela 4.1 – Materiais e respetivas propriedades das soluções construtivas do edifício em estudo.

		Material	Espessura [m]	Condutividade [W/(m.K)]	Densidade [kg/m ³]	Calor específico [J/(kg.K)]
Parede Interior	Interior	Reboco	0,015	1,300	2000	840
		Tijolo Furado 11	0,110	0,760	1600	840
		Caixa de ar	0,030			
		Tijolo furado 11	0,110	0,760	1600	840
	Interior	Reboco	0,015	1,3	2000	840
Parede Exterior	Exterior	Reboco	0,015	1,300	2000	840
		Tijolo Furado 15	0,150	0,760	1600	840
		Caixa de ar	0,030			
		Poliestireno extrudido	0,030	0,037	30	1450
		Tijolo furado 11	0,110	0,760	1600	840
	Interior	Reboco	0,015	1,300	2000	840
Cobertura Exterior	Exterior	Reboco	0,020	1,300	2000	840

	 Interior	Betão	0,200	2	2400	879
		Camada de forma em betão de argila expandida	0,050	0,700	1300	1000
		Impermeabilização (PVC flexível)	0,005	0,230	1200	1040
		Poliestireno extrudido	0,050	0,037	25-40	1450
		Gravilha /Brita	0,050	2	1000	840
Pavimento	Exterior	Reboco	0,020	1,300	2000	840
		Betão	0,200	2	2400	879
		Betonilha	0,040	1,300	2400	1000
	Interior	Soalho Flutuante de Madeira	0,010	0,150	1200	1500

Para o pavimento que está em contacto com o solo e teto foram considerados os materiais e as propriedades das soluções construtivas presentes na Tabela 4.1, da cobertura exterior e pavimento, respetivamente, embora por ordem inversa [12] [13].

Através da espessura e da condutividade presentes na Tabela 4.1, calculou-se o coeficiente de transmissão térmica (U), expresso em $W/(m^2.K)$ para as soluções construtivas através da seguinte equação:

$$U = R^{-1} \Leftrightarrow U = \frac{1}{\frac{L}{\lambda}} \quad (4.1)$$

em que L corresponde à espessura, em metros, e λ à condutividade térmica do material, em $W/(m.K)$. Ademais, para o cálculo da resistividade superficial interior e exterior foram considerados os valores ilustrados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Valores das resistências térmicas superficiais de R_{se} e R_{si} [14]

Sentido do fluxo de calor		Resistência térmica [$m^2 \cdot ^\circ C/W$]	
		Exterior R_{se}	Interior R_{si}
Horizontal		0,04	0,13
Vertical	Ascendente	0,04	0,10
	Descendente	0,04	0,17

Deste modo, foram obtidos os seguintes coeficientes de transmissão térmica, ilustrados nas Tabela 4.3 (edifício isolado) e Tabela 4.4 (edifício não isolado).

Tabela 4.3 – Valores de coeficiente de transmissão térmica para as soluções construtivas do edifício isolado.

	Parede Interior	Parede Exterior	Cobertura Exterior	Pavimento Solo	Teto/Pavimento
$U [W/(m^2 \cdot K)]$	1,75	0,74	0,58	0,56	2,11

Tabela 4.4 - Valores de coeficiente de transmissão térmica para as soluções construtivas do edifício não isolado.

	Parede Interior	Parede Exterior	Cobertura Exterior	Pavimento Solo	Teto/Pavimento
$U [W/(m^2 \cdot K)]$	1,75	1,87	2,68	2,25	2,11

4.3. Vãos envidraçados

Para o edifício em estudo foram definidos dois tipos de vidros: vidro simples e vidro duplo. Em seguida são apresentadas as características de cada vão envidraçado.

Vidro simples:

- Espessura de 6 mm;
- Coeficiente de transmissão térmica de $4,90 W/(m^2 \cdot K)$;
- Fração envidraçada do vidro de 0,7;
- Caixilharia com um coeficiente de transmissão térmica médio dia-noite de $3,5 W/(m^2 \cdot K)$ [15].

Vidro duplo:

- Dois vidros com espessura de 6 mm cada, divididos por uma camada de ar atmosférico de 5 mm;
- Resistência térmica do ar atmosférico de $0,18 (m^2 \cdot K)/W$;
- Coeficiente de transmissão térmica de $2,70 W/(m^2 \cdot K)$;
- Fração envidraçada do vidro de 0,7;
- Caixilharia com um coeficiente de transmissão térmica médio dia-noite de $2,4 W/(m^2 \cdot K)$ [15].

4.4. Ocupação

Relativamente à ocupação, esta foi dividida em três espaços fundamentais: cozinha, sala e quarto. A Tabela 4.5 apresenta os fatores de ocupação para cada zona [16].

Tabela 4.5 – Percentagem de ocupação nas zonas fundamentais do edifício, por período horário.

Período [horas]	Semana			Fins de Semana		
	Quartos	Sala	Cozinha	Quartos	Sala	Cozinha
0h - 6h	91%	0%	0%	53%	0%	0%
6h - 8h	0%	20%	43%	53%	0%	0%
8h - 12h	0%	17%	0%	10%	33%	10%
12h - 14h	0%	0%	25%	0%	20%	33%
14h - 17h	0%	23%	0%	0%	43%	0%
17h - 20h	0%	39%	36%	0%	53%	10%
20h - 22h	0%	45%	45%	0%	20%	33%
22h - 24h	61%	30%	0%	20%	23%	10%

4.5. Iluminação e equipamentos elétricos

A iluminação e os equipamentos elétricos são variáveis com bastante relevância em termos de ganhos de calor interno de uma habitação. Assim, de modo a aproximar ao máximo a carga utilizada pelo consumidor português relativamente a este indicador, baseou-se o seu consumo em Oliveira Panão e Brito [16]. Este apresenta o perfil diário para a eletricidade consumida numa casa num mês de meia-estação.

Sabendo que na carga elétrica de uma habitação irão estar representados os consumos de iluminação, equipamentos elétricos e de energia utilizada para aquecimento e arrefecimento ambiente, procedeu-se à escolha de um dia em que não existe carga de aquecimento e arrefecimento. Este dia corresponde a um dia do mês de outubro [16].

Isolando da carga total elétrica o consumo de energia por parte dos equipamentos elétricos e da iluminação, resta apenas, para termos de simulação, dividir a carga elétrica em dois tipos: carga para iluminação e carga para equipamentos elétricos. A carga para iluminação foi distribuída pelas três zonas fundamentais – iluminação da sala, cozinha e quartos – e a carga para equipamentos elétricos foi distribuída em duas zonas – cozinha e sala –, sendo que a cozinha apresenta uma maior expressão em termos de consumo, representando 2/3 da carga total atribuída ao equipamento elétrico.

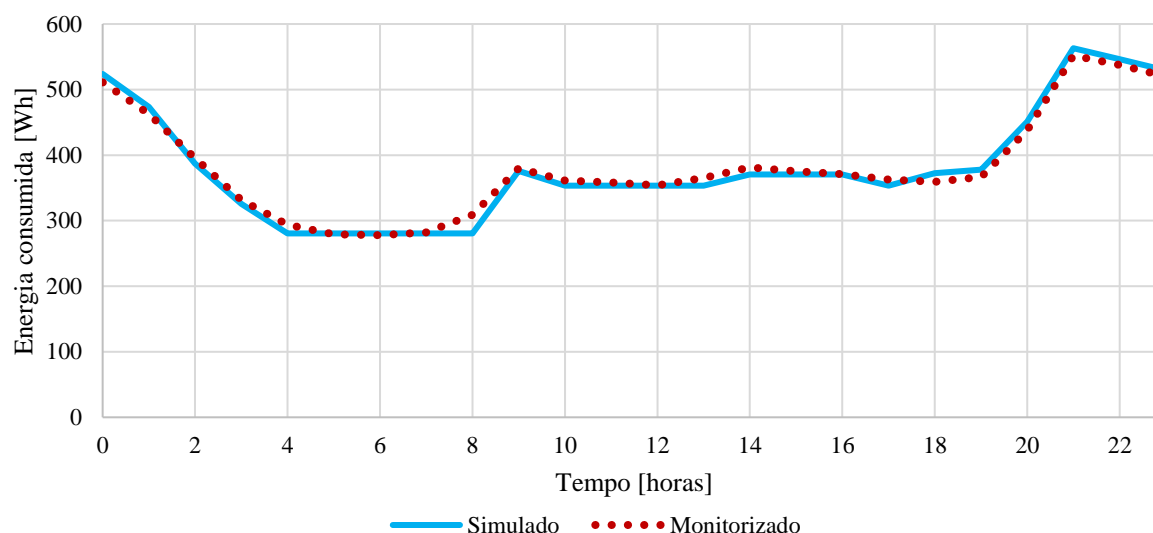


Figura 4.4 – Representação gráfica da carga elétrica para o dia do mês de outubro, considerando a iluminação e os equipamentos elétricos.

Observando a Figura 4.4 verifica-se que a carga de iluminação e de equipamentos elétricos para uma habitação, para um dia, encontra-se bem representada (com um erro médio aproximado de 2,26%), assegurando assim a fiabilidade dos dados face ao consumo na habitação dos portugueses.

4.6. Clima

Para estudar o desempenho do sistema no edifício foram selecionados dois climas: clima de Lisboa e de Viseu. Seguidamente são apresentadas as características de cada um.

Para Lisboa, as coordenadas geográficas utilizadas para a posterior simulação foram as seguintes:

- latitude de 38,73 graus;
- longitude de -9,15 graus;
- elevação de 71 metros.

Para Viseu, as coordenadas geográficas utilizadas foram as seguintes:

- latitude de 40,72 graus;
- longitude de -7,92 graus;
- elevação de 497 metros.

De modo a caracterizar as necessidades de aquecimento para ambos os climas encontram-se representados abaixo as figuras das temperaturas correspondentes ao clima de Lisboa (Figura 4.5) e de Viseu (Figura 4.6). Os dados climáticos para o clima de Lisboa e Viseu não correspondem a um ano específico, mas sim a um ano meteorológico típico, representativo do clima com base em dados climáticos ao longo de 30 anos [17] [18].

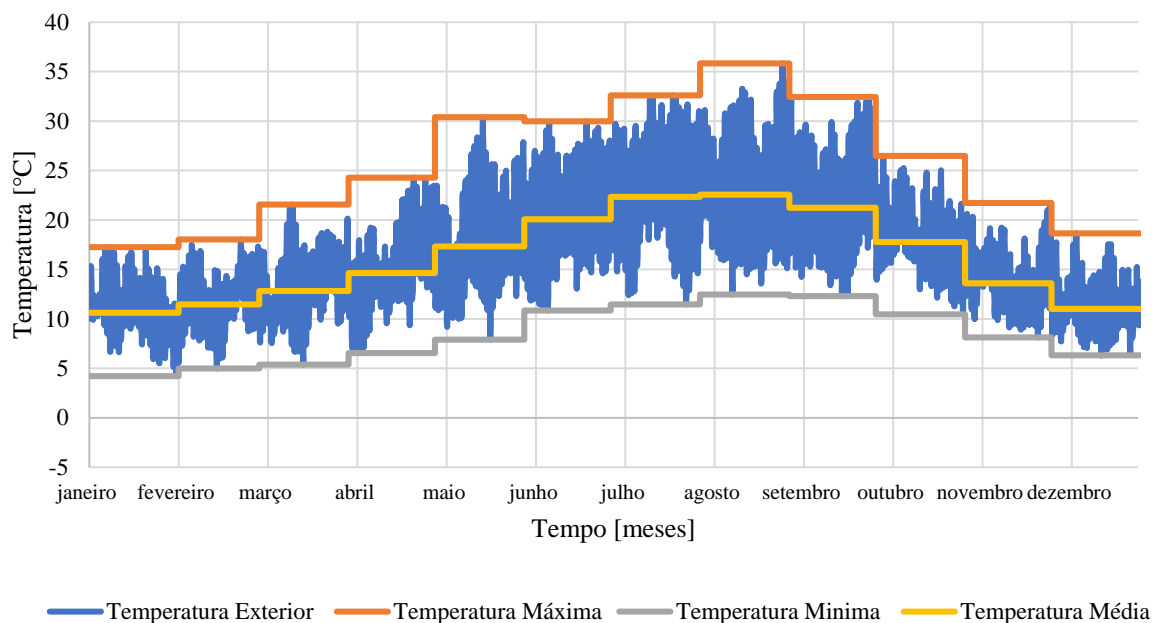


Figura 4.5 – Temperatura em graus Celsius para a cidade de Lisboa, em dias e meses, durante um ano.

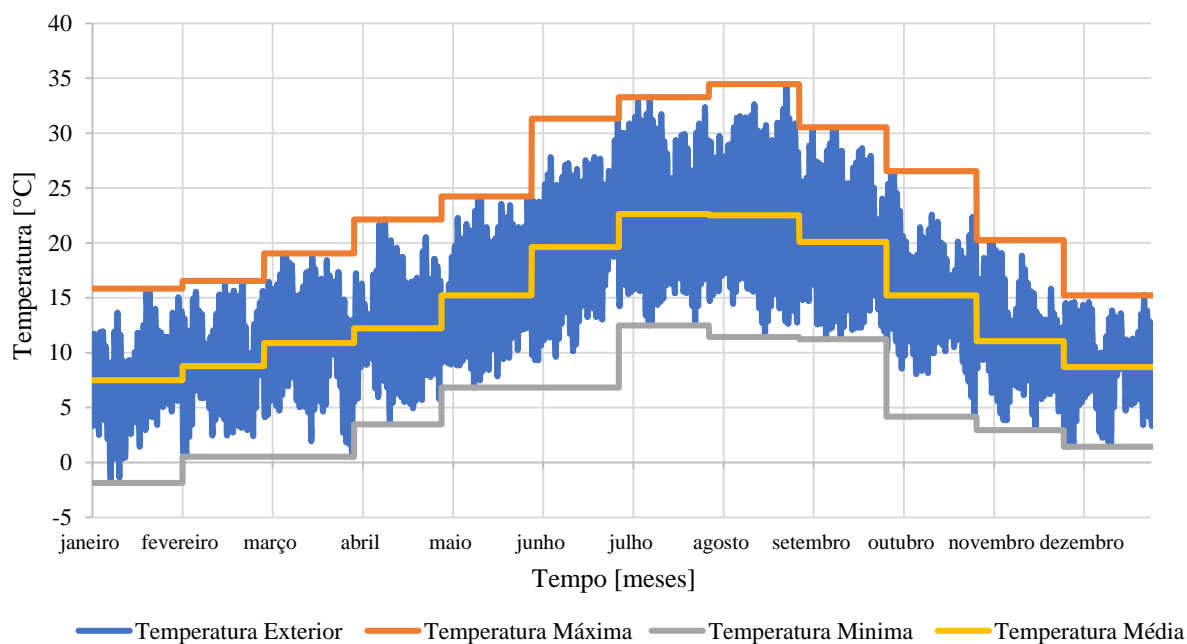


Figura 4.6 – Temperatura em graus Celsius para a cidade de Viseu, em dias e meses, durante um ano.

Para o clima de Lisboa verifica-se que o valor máximo da temperatura é atingido no mês de agosto, apresentando um valor de 35,85°C, a temperatura mínima no mês de janeiro, registando um valor de 4,23°C, e o valor médio de temperatura anual apresenta um valor de 16,32°C.

Para o clima de Viseu verificam-se valores máximo e mínimo de temperatura de 34,48°C (registado no mês de agosto) e -1,86°C (registado no mês de janeiro), respetivamente. Quanto ao valor médio de temperatura anual é apresentado um valor de 14,57°C.

Observando a Figura 4.5 e a Figura 4.6 verifica-se que para os meses de janeiro, fevereiro, março, abril, novembro e dezembro ambos os climas apresentam uma temperatura média inferior a 15°C.

Tabela 4.6 – Valores da temperatura exterior média ($T_{\text{ext}} \text{ médio}$) e radiação global ($G_{\text{total}} \text{ média}$) mensal, para Lisboa e Viseu.

Meses	Lisboa		Viseu	
	$T_{\text{ext}} \text{ médio [}^{\circ}\text{C]}$	$G_{\text{total}} \text{ média [W/m}^2\text{]}$	$T_{\text{ext}} \text{ médio [}^{\circ}\text{C]}$	$G_{\text{total}} \text{ média [W/m}^2\text{]}$
janeiro	10,63	158,01	7,49	142,49
fevereiro	11,48	189,83	8,79	184,59
março	12,84	224,43	10,89	261,05
abril	14,64	277,30	12,22	305,07
maio	17,34	331,29	15,24	361,44
junho	20,07	348,29	19,64	425,53
julho	22,35	380,38	22,65	426,60
agosto	22,56	363,25	22,52	394,99
setembro	21,25	283,19	20,09	307,89
outubro	17,78	225,23	15,23	216,72
novembro	13,60	185,11	11,05	170,11
dezembro	11,01	163,18	8,70	127,37

Observando a Tabela 4.6 verifica-se que Lisboa possui uma temperatura média mensal superior ao clima de Viseu para todos os meses do ano, exceto para o mês de julho. Ademais, constata-se que para os meses de janeiro, fevereiro, março, abril, maio, outubro, novembro e dezembro a temperatura exterior média mensal para Viseu é inferior cerca de 2°C.

Verifica-se ainda que para os meses de março, abril e maio, Viseu apresenta maiores valores de radiação global em cerca de 16%, 10% e 9%, apesar da sua temperatura exterior média mensal ser inferior cerca de 2°C. Ademais, verifica-se que de junho a setembro o clima de Viseu apresenta valores de radiação global superiores aos registados para o clima de Lisboa.

Deste modo, sendo o edifício em estudo igual para os dois climas, é expectável que a energia necessária para responder às necessidades de aquecimento do caso em estudo seja superior no clima de Viseu.

Recorrendo ao Despacho (extrato) nº15793-F/2013 do Decreto-Lei nº. 118/2013 verifica-se que para os vários concelhos de Portugal correspondem diferentes zonas climáticas de inverno, podendo estas ser agrupadas em três categorias: I1, I2 e I3 [19].

Sabendo que graus dia corresponde ao número de graus em que a temperatura média exterior horária encontra-se acima ou abaixo de uma temperatura base, foram agrupadas as três categorias indicadas anteriormente de acordo com o número de graus dia na base 18°C:

- Zona I1, $GD \leq 1300$;
- Zona I2, $1300 < GD \leq 1800$;

- Zona I3, GD > 1800.

Através da Nomenclatura das Unidades Territoriais para Fins Estatísticos (NUTS) de nível III, Lisboa e Viseu inserem-se na categoria de Grande Lisboa e Dão-Lafões, respetivamente, apresentando um número de graus dias correspondente a 1071 (zona climática de inverno I1) e 1702 (zona climática de inverno I2) [19].

No entanto, através dos ficheiros climáticos de Lisboa e Viseu procedeu-se ao cálculo do número de graus dia de forma a verificar se os climas correspondem efetivamente às zonas climáticas de inverno I1 e I2. Para isso, foi determinada a duração da estação de aquecimento considerando que a mesma tem início (ni) e fim (nf) quando a temperatura média diária, num período de 10 dias consecutivos, encontra-se abaixo e acima dos 15°C, respetivamente.

Tabela 4.7 – Dias julianos correspondentes ao início e fim da estação de aquecimento.

	Lisboa		Viseu	
	Dia Juliano	Dia do ano correspondente	Dia Juliano	Dia do ano correspondente
ni	315	11 de novembro	300	27 de outubro
nf	107	17 de abril	141	21 de maio

Conhecendo a duração da estação de aquecimento para cada clima foram calculados os números de graus dia correspondentes, obtendo um total de 972 e 1563 GD para Lisboa e Viseu, respetivamente. Recorrendo às categorias anteriormente agrupadas verifica-se que Lisboa e Viseu inserem-se nas zonas climáticas I1 e I2, confirmando a informação que consta no Despacho (extrato) nº15793-F/2013 do Decreto-Lei nº. 118/2013.

4.7. Infiltração

Sendo o caso de estudo aplicado a climas distintos é importante aproximar ao máximo os valores de infiltração para Lisboa e Viseu. Conhecendo a zona climática de inverno das duas cidades resta apenas conhecer a categoria de permeabilidade de ar das janelas na qual estas se encontram, podendo ser divididas em três categorias fundamentais: A2, A1 e NC. Na categoria A2 as janelas possuem uma maior barreira à passagem de ar e são comumente utilizadas nas novas construções. A categoria A1 possui uma permeabilidade de ar intermédia entre A2 e NC, representando esta última uma categoria de janelas não classificadas [20].

Tratando-se de dois tipos de janelas, janelas de vidro duplo e de vidro simples, foram-lhes atribuídos os seguintes valores de infiltração em renovações de ar por hora (ac/h), considerando a respetiva zona climática de inverno e a permeabilidade de ar:

Tabela 4.8 – Renovações de ar por hora para os dois tipos de vidro, para o clima de Lisboa e Viseu [20].

Permeabilidade de ar das janelas	Renovações de ar por hora [ac/h]	
	A2	A1
Lisboa	0,3	0,9
Viseu	0,3	0,8

4.8. AQS e AA

Para estudar o sistema para os climas de Viseu e Lisboa é importante quantificar as necessidades de águas quentes sanitárias e de aquecimento ambiente. Relativamente às águas quentes sanitárias foram considerados dois critérios para o tratamento da carga:

1. O volume de água necessário por pessoa para corresponder a todas as suas necessidades diárias apresenta o valor de 40 litros;
2. A temperatura de saída da água deve apresentar um valor de 55°C [21].

Foi definida uma ocupação por apartamento corresponde ao número da sua tipologia mais um, ou seja, para a tipologia T2 a ocupação apresenta um total de 3 pessoas. Assim, sendo o edifício em estudo constituído por seis T2 e cinco T3, a ocupação total do edifício apresenta um valor total de 38 pessoas, correspondendo a um total de 1520 litros utilizados por dia.

Outro fator a ser considerado para a caracterização de AQS é o horário e fator de utilização sobre os litros da capacidade total. De modo a obter dados fidedignos foram escolhidos dados de uso de AQS monitorizados por Fraga C.[10] de uma semana aleatória. Estes dados encontram-se ilustrados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Horários e percentagem de utilização de águas quentes sanitárias do edifício em estudo.

Horas	Segunda-Feira	Terça-Feira	Quarta-Feira	Quinta-Feira	Sexta-Feira	Sábado	Domingo
1:00	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
2:00	0%	16%	0%	0%	8%	0%	0%
3:00	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
4:00	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
5:00	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
6:00	14%	4%	33%	16%	0%	0%	0%
7:00	22%	17%	8%	13%	19%	0%	0%
8:00	0%	0%	0%	0%	18%	0%	0%
9:00	0%	0%	0%	0%	0%	10%	20%
10:00	0%	0%	0%	0%	0%	14%	10%
11:00	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
12:00	0%	19%	0%	0%	0%	0%	0%
13:00	0%	6%	0%	0%	0%	0%	18%
14:00	0%	0%	17%	11%	5%	0%	7%
15:00	0%	0%	18%	12%	5%	26%	0%
16:00	6%	0%	0%	0%	4%	5%	19%
17:00	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
18:00	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
19:00	0%	9%	0%	5%	0%	0%	0%
20:00	22%	14%	25%	20%	0%	12%	22%
21:00	20%	16%	0%	16%	14%	13%	5%
22:00	17%	1%	0%	7%	19%	16%	0%
23:00	0%	0%	0%	0%	7%	4%	0%
24:00	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Para calcular a energia necessária de AQS para o edifício recorreu-se à seguinte equação:

$$Q_{dhw} = L_{\text{água}} \times \rho_{\text{água}} \times (T_{\text{água saída}} - T_{\text{exterior}}) \times 4.18 \times 0.278 \quad (4.2)$$

em que $L_{\text{água}}$ corresponde ao número de litros de água usados, $\rho_{\text{água}}$ à densidade da água a 25°C, correspondendo a $0,997 \frac{g}{cm^3}$, $T_{\text{água saída}}$ à temperatura de saída da água, que deverá ser de 55°C, T_{exterior} à temperatura exterior referente ao clima de Lisboa e Viseu, 4.18 corresponde a $\frac{KJ}{Kg.K}$ e 0.278 a $\frac{KJ}{Wh}$.

Quanto às necessidades de aquecimento ambiente estas são calculadas através do programa de simulação *EnergyPlus*, onde este indica uma carga de aquecimento sempre que se verifique que a temperatura dos espaços a estudar possui um valor inferior a 19°C.

Relativamente à temperatura de saída para aquecimento ambiente do edifício em estudo, para responder às respetivas necessidades de aquecimento, quer para o clima de Lisboa quer para o de Viseu, esta foi calculada através da seguinte equação:

$$y = mx + b \quad (4.3)$$

sendo que y corresponde à temperatura de saída para aquecimento ambiente, expressa em graus Celsius, m apresenta o valor de -0,13, x corresponde à temperatura exterior (para os climas de Lisboa e Viseu), expressa em graus Celsius, e b toma o valor de 30 graus Celsius [10].

5. Resultados

5.1. Cenários de estudo

Para analisar o sistema nos climas de Lisboa e Viseu são considerados dois tipos de edifícios: com e sem isolamento (C.I. e S.I., respetivamente). No primeiro, os materiais e as propriedades das soluções construtivas correspondem às da Tabela 4.1. No caso sem isolamento, os materiais isolantes são retirados, nomeadamente o poliestireno extrudido de três e cinco centímetros.

Foram criados oito cenários de estudo, conforme indica a Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Cenários de estudo para o sistema para os climas de Lisboa e Viseu.

Cenários	Clima	Categoria de permeabilidade de ar das janelas	Renovações de ar por hora [ac/h]	Isolamento na envolvente Opaca
Cenário 1	Lisboa	A2	0,3	Com
Cenário 2				Sem
Cenário 3		A1	0,9	Com
Cenário 4				Sem
Cenário 5	Viseu	A2	0,3	Com
Cenário 6				Sem
Cenário 7		A1	0,8	Com
Cenário 8				Sem

Em todos os cenários de simulação foi garantido que a concentração média de dióxido de carbono, em partes por milhão (ppm), no período de oito horas consecutivas não ultrapassava o valor de 1625 ppm para todas as zonas térmicas do edifício.

Todos os cenários apresentam uma área de coletores de 116 m², uma área útil total de aquecimento de 772 m² e possuem uma temperatura limite do evaporador da bomba de calor de -15°C.

Os cenários base para os climas de Lisboa e Viseu correspondem aos cenários 1 e 5, respetivamente, sendo estes os que representam uma categoria de permeabilidade de ar de janelas A2, uma infiltração em renovações de ar por hora de 0,3 e um edifício com isolamento.

Relativamente ao sistema foram analisadas quatro variantes:

- necessidades de aquecimento ambiente;
- temperatura limite do evaporador da bomba de calor;
- área de coletor;

As variantes temperatura limite do evaporador da bomba de calor e área de coletor foram apenas estudadas para os cenários base.

5.2. Variante Aquecimento ambiente

5.2.1. Lisboa

Para a variante aquecimento ambiente para o clima de Lisboa obtiveram-se os seguintes valores:

Tabela 5.2 – Resultados do sistema para os cenários de estudo correspondentes ao clima de Lisboa.

		Lisboa			
		Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
Entrada [kWh/(m ² .ano)]	Q_{sol,dir}	6,51	7,03	7,05	8,08
	Q_{sol,hp}	19,18	22,45	23,55	27,76
	E_{hp}	7,57	9,06	9,45	11,22
	E_{dir}	0,00	0,00	0,00	0,00
Saída [kWh/(m ² .ano)]	Q_{sol,dem}	1,04	2,24	2,06	3,28
	Q_{hp,dem}	5,56	7,21	7,51	9,46
	Q_{st,dem}	20,29	22,94	24,46	28,36
	E_{dir}	0,00	0,00	0,00	0,00
Armazenamento [kWh/(m ² .ano)]	Q_{sol,st}	5,47	4,79	5,00	4,80
	Q_{hp,st}	21,19	24,30	25,49	29,53
	Q_{st,dem}	20,29	22,94	24,46	28,36
	Q_{st,loss}	6,37	6,15	6,03	5,97
Carga [kWh/(m ² .ano)]	Q_{AQS}	26,34	26,34	26,34	26,34
	Q_{AA}	0,54	6,04	7,67	14,76
	Q_{total}	26,89	32,38	34,01	41,10
Desempenho	SPF_{hp}	3,53	3,48	3,49	3,47
	SPF_{sys}	3,55	3,57	3,60	3,66

Observando a Tabela 5.2 verifica-se que para os diferentes cenários de estudo para o clima de Lisboa estes apresentam diferentes valores para as diversas categorias de estudo: **Entrada, Saída, Armazenamento e Desempenho**, bem como das suas necessidades de aquecimento.

De modo a facilitar a interpretação dos valores obtidos na Tabela 5.2 foram elaboradas as seguintes figuras por categoria de estudo.

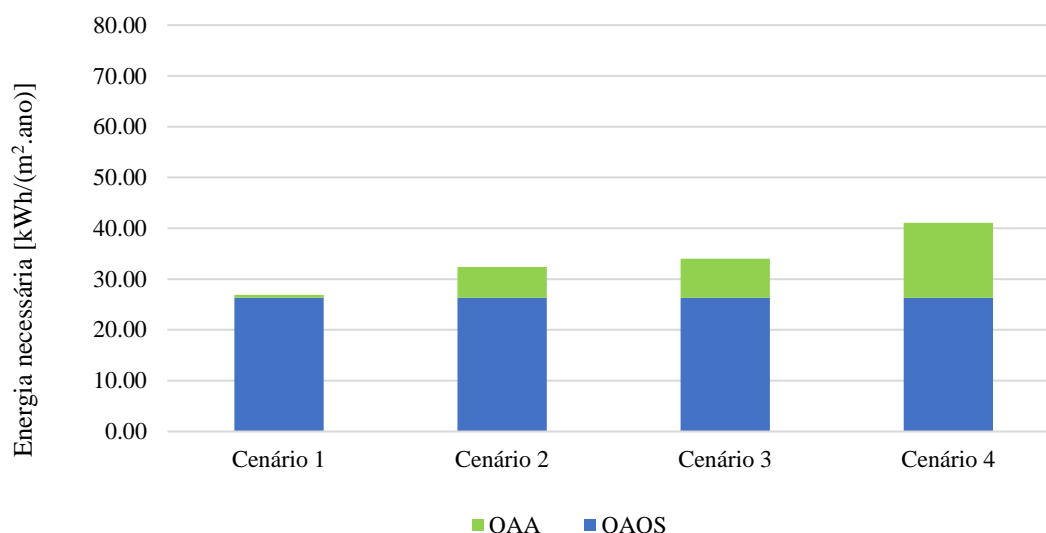


Figura 5.1 – Necessidades de aquecimento de AA e AQS para os cenários de Lisboa.

Observando a Figura 5.1 e a Tabela 5.2 verifica-se que os cenários 1, 2, 3 e 4 apresentam necessidades de aquecimento de águas quentes sanitárias constante de 26,34 kWh/(m².ano) e que esta é sempre superior à carga de aquecimento ambiente. As necessidades de AQS são constantes e iguais para os quatro cenários uma vez que para estes, a ocupação do edifício e o perfil de consumo de AQS é a mesma.

Relativamente ao aquecimento ambiente, o mesmo não se verifica. O cenário que apresenta uma menor carga de aquecimento ambiente é o cenário 1, (0,54 kWh/(m².ano)), que possui janelas com uma categoria de permeabilidade ao ar A2, uma renovação de ar por horas de 0,3 e uma envolvente isolada termicamente. Por outro lado, o cenário que possui um valor de carga de aquecimento ambiente maior é o cenário 4 (14,76 kWh/(m².ano)), que apresenta janelas com uma categoria de permeabilidade A1, uma renovação de ar de 0,9 e uma envolvente sem isolamento térmico.

Face ao cenário base (cenário 1), os cenários 2, 3 e 4 apresentam um incremento de energia para aquecimento ambiente de cerca de 20%, 26% e 53%, respetivamente.

Para a categoria **Entrada**:

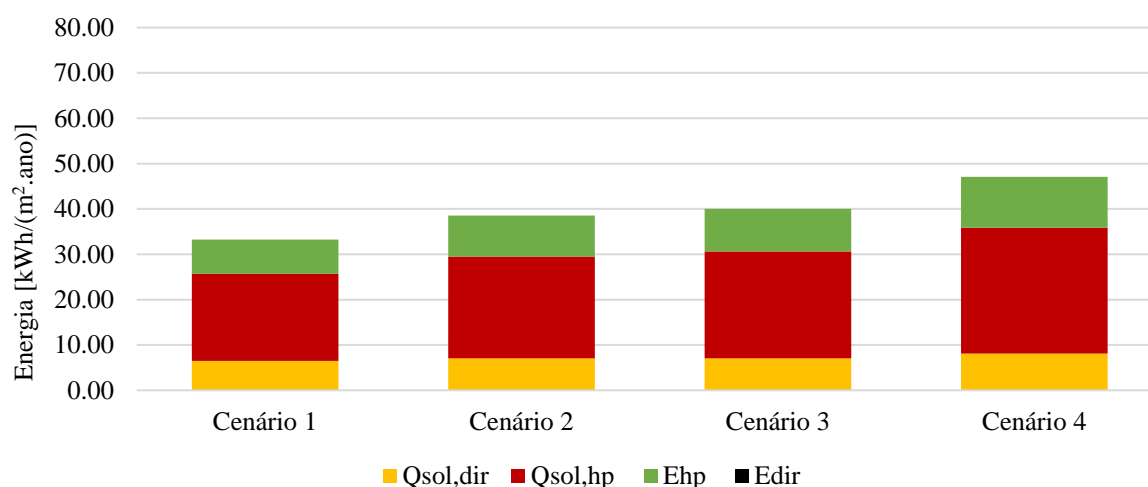


Figura 5.2 – Resultados obtidos para a categoria Entrada para os cenários de Lisboa.

Observando a Figura 5.2 e a Tabela 5.2 verifica-se para os quatro cenários de estudo que mais de 76% da energia produzida pelo sistema para colmatar as necessidades energéticas de AQS e AA provém de fonte renovável.

Através das mesmas, observa-se que a produção de calor por parte do coletor, que é fornecida à bomba de calor ($Q_{sol, hp}$), é superior em todos os cenários a $Q_{sol, dir}$. Da energia produzida pela componente solar 75%, 76%, 77% e 77% correspondendo aos cenários 1, 2, 3 e 4, respetivamente têm como destino $Q_{sol, hp}$.

O consumo de energia por parte da bomba de calor (E_{hp}), aumenta do cenário 1 para o cenário 4. Tendo em conta o cenário base (cenário 1), o aumento é de 20%, 25%, e 48% para os cenários 2, 3 e 4, respetivamente.

A nível do consumo de energia pela resistência elétrica (E_{dir}) verifica-se que não existe consumo por parte deste sistema, permitindo afirmar que o sistema consegue responder a todas as necessidades de aquecimento presentes no edifício.

Para a categoria **Saída**:

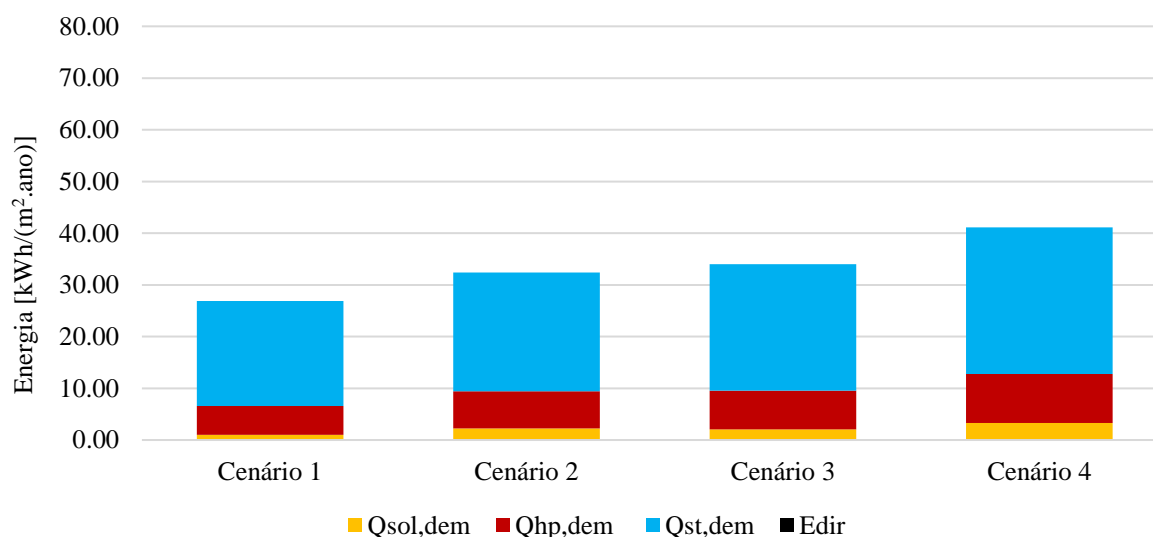


Figura 5.3 – Resultados obtidos para a categoria Saída para os cenários de Lisboa.

Pela análise da Figura 5.3 e pela Tabela 5.2 verifica-se que o depósito apresenta a maior parcela de energia utilizada para colmatar as necessidades de aquecimento, entre 20,29 kWh/(m².ano) para o cenário 1 e 28,36 kWh/(m².ano) para o cenário 4. A segunda componente responsável pela resposta às necessidades de calor sobe a forma direta é a bomba de calor, seguida pelo coletor solar.

Sendo o depósito o principal componente responsável pela resposta direta às necessidades de aquecimento é importante caracterizar os respetivos ganhos e perdas de energia deste. Tais factos encontram-se ilustrados na Figura 5.4.

Para a categoria **Depósito**:

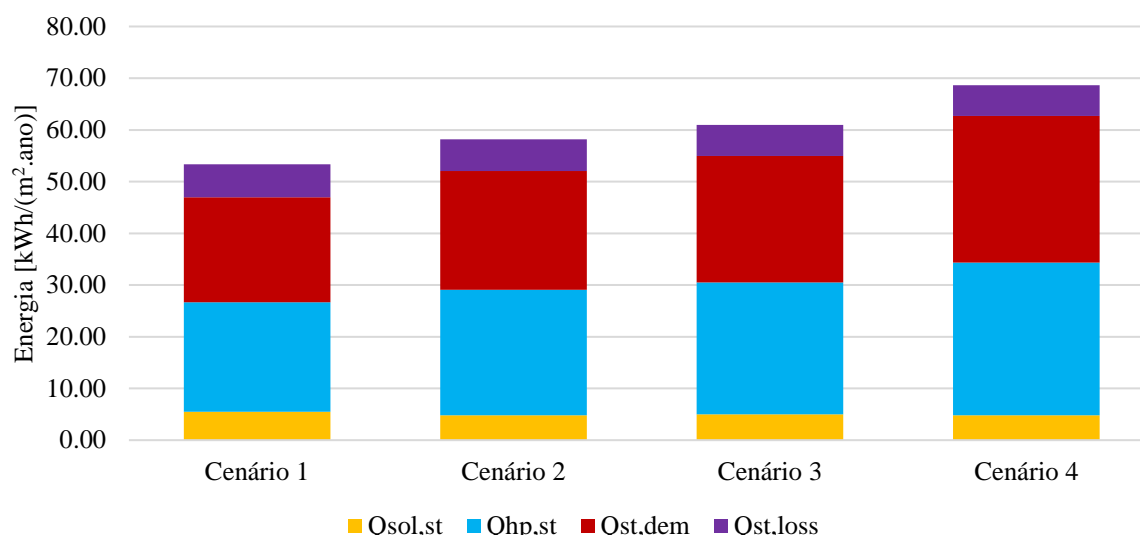


Figura 5.4 – Resultados obtidos para a categoria Depósito para os cenários de Lisboa.

Observando a Figura 5.4 e a Tabela 5.2 verifica-se que a maior parte dos ganhos de energia no depósito se devem ao excesso de energia produzida por parte da bomba de calor ($Q_{hp,st}$), para os quatro cenários.

Ademais, para os quatro cenários verifica-se que a energia perdida pelo depósito ($Q_{st,loss}$) é superior à energia produzida por parte do coletor e que é armazenada no depósito ($Q_{sol,st}$).

Para a categoria **Desempenho**:

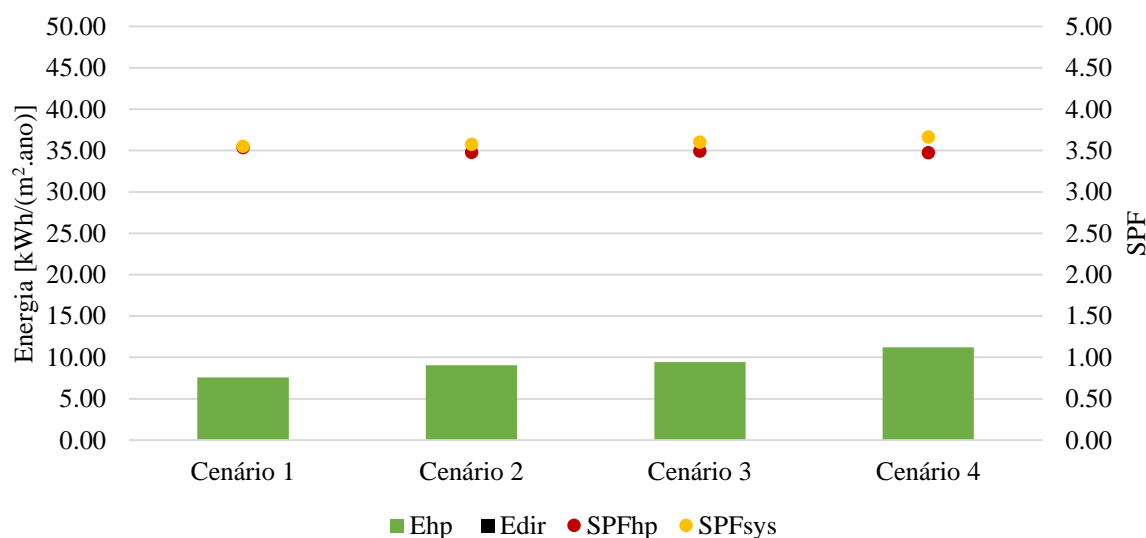


Figura 5.5 – Resultados obtidos para a categoria Desempenho para os cenários de Lisboa.

Observando a Tabela 5.2 verifica-se que a bomba de calor e o sistema apresentam SPF máximos de, 3,53 para o cenário 1 e 3,66 para o cenário 4, respetivamente. Ademais pela Figura 5.5 verifica-se que com o aumento do valor de Ehp do cenário 1 para o cenário 4, os valores obtidos referentes ao SPFhp para os quatro cenários possuem valores muito próximos. O mesmo constata-se para os valores obtidos de SPFsys.

Comparando o SPF_{hp} e SPF_{sys} obtido para este edifício para o clima de Lisboa para os quatro cenários, verifica-se que os valores obtidos são semelhantes.

5.2.2. Viseu

Para a variante aquecimento ambiente para o clima de Viseu obtiveram-se os seguintes valores:

Tabela 5.3 – Resultados do sistema para os cenários de estudo correspondentes ao clima de Viseu.

		Viseu			
		Cenário 5	Cenário 6	Cenário 7	Cenário 8
Entrada [kWh/(m ² .ano)]	$Q_{sol,dir}$	14,05	14,87	15,42	15,85
	$Q_{sol,hp}$	15,49	19,04	20,94	25,86
	E_{hp}	6,83	8,45	9,37	11,26
	E_{dir}	0,01	0,02	0,02	0,02
Saída [kWh/(m ² .ano)]	$Q_{sol,dem}$	3,15	4,34	4,70	5,88
	$Q_{hp,dem}$	5,81	7,51	8,67	10,93
	$Q_{st,dem}$	20,02	23,32	25,38	29,25
	E_{dir}	0,01	0,02	0,02	0,02
Armazenamento [kWh/(m ² .ano)]	$Q_{sol,st}$	10,90	10,53	10,72	9,97
	$Q_{hp,st}$	16,51	19,99	21,65	26,19
	$Q_{st,dem}$	20,02	23,32	25,38	29,25
	$Q_{st,loss}$	7,39	7,20	6,98	6,91
Carga [kWh/(m ² .ano)]	Q_{AQS}	27,34	27,34	27,34	27,34
	Q_{AA}	1,65	7,85	11,43	18,74
	Q_{total}	28,99	35,19	38,77	46,08
Desempenho	SPF_{hp}	3,27	3,25	3,23	3,30
	SPF_{sys}	4,24	4,15	4,13	4,08

Observando a Tabela 5.3 verifica-se que para os diferentes cenários de estudo para o clima de Viseu estes apresentam diferentes valores para as diversas categorias de estudo: **Entrada, Saída Armazenamento e Desempenho**.

De modo a facilitar a interpretação dos valores obtidos na tabela foram elaboradas as seguintes figuras por categorias de estudo:

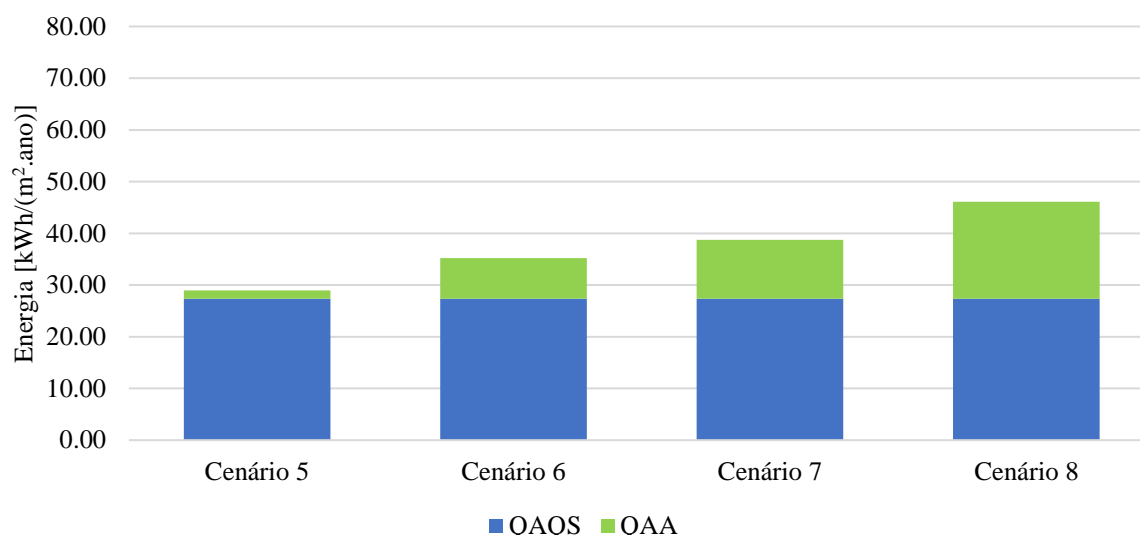


Figura 5.6 – Necessidades de aquecimento de AE e AQS para os cenários de Viséu.

Observando a Figura 5.6 e a Tabela 5.3 verifica-se, um valor de 27,34 kWh/(m².ano) para a necessidade de AQS para os cenários 5, 6, 7 e 8. Este valor é igual para os quatro cenários pelo mesmo motivo apresentado para o cenário de Lisboa.

A nível do AA verifica-se que o cenário 8, que corresponde à categoria de permeabilidade ao ar A1, a uma infiltração com uma renovação de ar por hora de 0,8 e a um edifício sem isolamento, é o que apresenta um maior valor (18,74 kWh/(m².ano)). Por outro lado, o menor valor correspondente à necessidade de AA é representado pelo cenário 5 (cenário base para o clima de Viséu), que corresponde à categoria de permeabilidade ao ar A2, a uma infiltração com uma renovação de ar por hora de 0,3 e a um edifício com isolamento, tendo esta um valor de 1,65 kWh/(m².ano).

No que diz respeito à carga total necessária para aquecimento, face ao cenário base, os cenários 6, 7 e 8 apresentam um aumento de energia total para aquecimento de 21%, 34% e 59%, respetivamente.

Para a categoria **Entrada**:

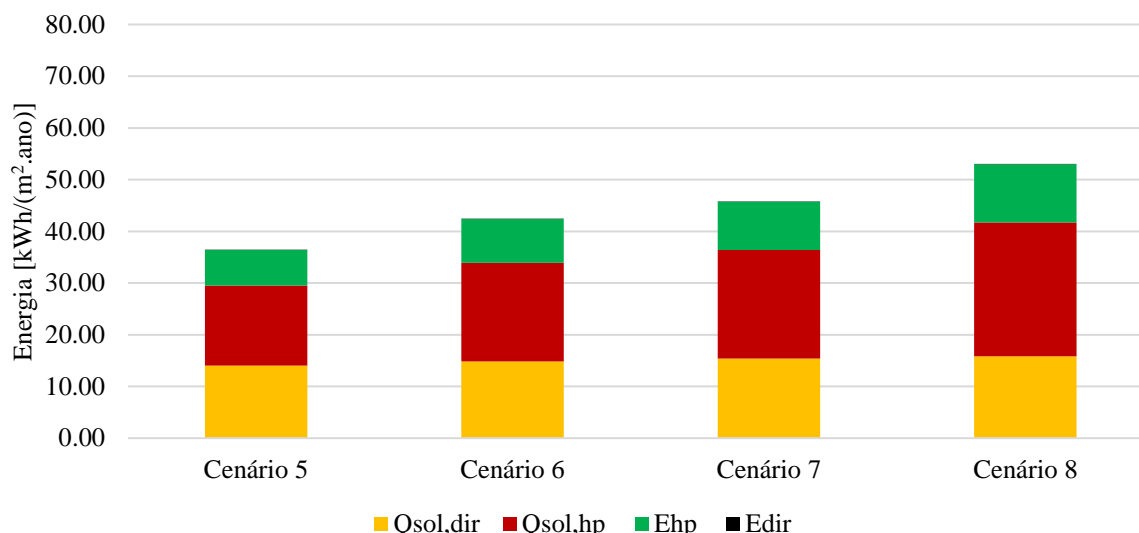


Figura 5.7 – Resultados obtidos para a categoria Entrada para os cenários de Viseu.

Pela análise da Tabela 5.3 e da Figura 5.7 verifica-se que cerca 80% da produção de energia utilizada para colmatar as necessidades energéticas de AQS e AA é do tipo renovável.

Através das mesmas, observa-se que a produção de calor por parte do coletor, que é fornecida à bomba de calor ($Q_{sol,hp}$), é superior em todos os cenários face a $Q_{sol,dir}$. Contudo esta superioridade não é significativa uma vez que da energia produzida pela componente solar 48%, 44%, 42% e 38% para os cenários 5,6,7 e 8 respetivamente, têm como destino $Q_{sol,dir}$.

O consumo de energia por parte da bomba de calor (E_{hp}), aumenta do cenário 5 para o cenário 8. Tendo em conta o cenário base (cenário 5), o aumento é de 24%, 37%, e 65% para os cenários 6, 7 e 8, respetivamente.

A nível do consumo de energia pela resistência elétrica (E_{dir}) verifica-se a existência de consumo por parte deste sistema de 0,01 kWh/(m².ano) para o cenário 5 e de 0,02 kWh/(m².ano) para os cenários 6,7 e 8, permitindo aferir que o sistema por si só, não consegue dar resposta a todas as necessidades de aquecimento do edifício em estudo para o clima de Viseu.

Para a categoria **Saída**:

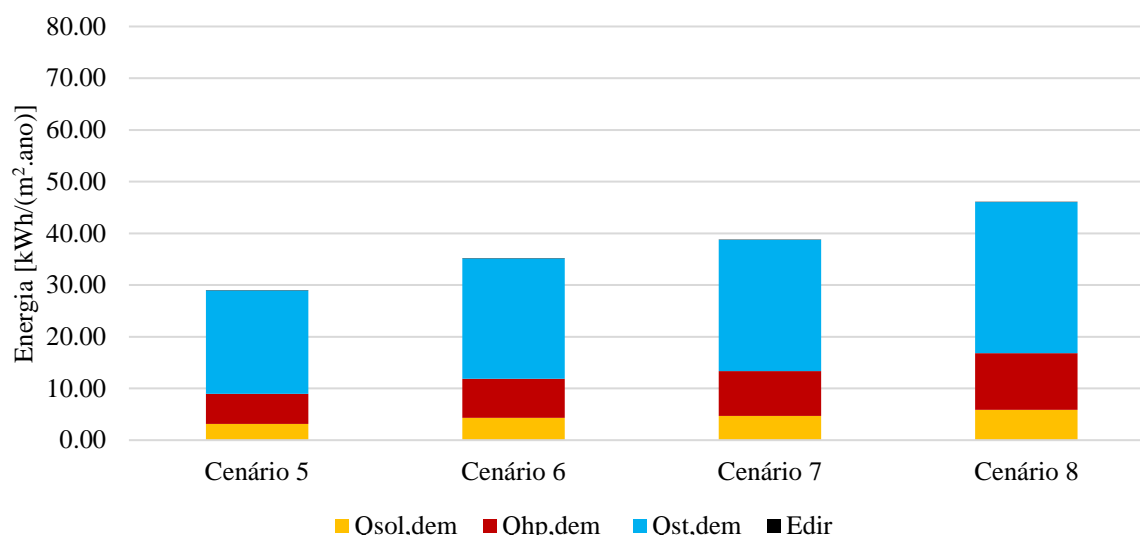


Figura 5.8 – Resultados obtidos para a categoria Saída para os cenários de Viseu.

Pela análise da Tabela 5.3 e da Figura 5.8 verifica-se que o depósito apresenta a maior parcela de energia utilizada para colmatar as necessidades de aquecimento, possuindo um valor mínimo de 20,02 kWh/(m².ano) para o cenário 5 e um valor máximo de 29,25 kWh/(m².ano). Relativamente à bomba de calor, a energia produzida por esta para dar resposta direta às necessidades de aquecimento face à energia produzida pelo coletor é cerca do dobro para os quatro cenários em estudo.

Sendo o depósito o principal componente responsável pela resposta direta às necessidades de aquecimento é importante caracterizar os respetivos ganhos e perdas de energia do depósito. Tais factos encontram-se ilustrados na Figura 5.9.

Para a categoria **Depósito**:

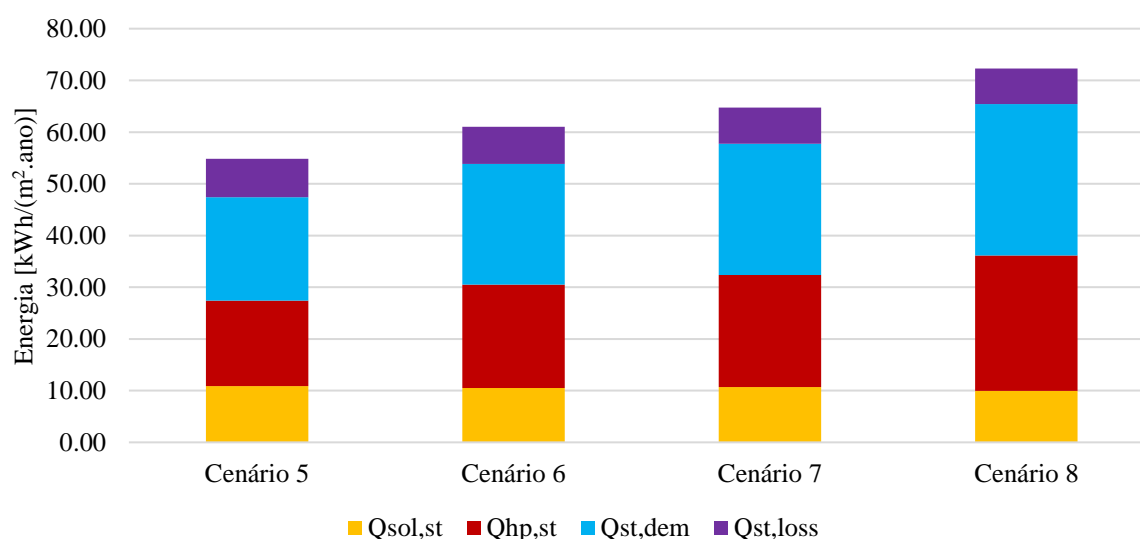


Figura 5.9 – Resultados obtidos para a categoria Depósito para os cenários de Viseu.

Observando a Tabela 5.3 e a Figura 5.9. verifica-se que 60%, 65%, 67% e 72% dos ganhos de energia no depósito para os cenários 5, 6, 7 e 8 provêm da energia produzida por parte da bomba de calor,. Constata-se que, com o aumento dos valores da necessidade de aquecimento do cenário 5 para o cenário

8, a energia armazenada no depósito proveniente da bomba de calor ($Q_{hp,st}$) aumenta de 16,51 kWh/(m².ano) para 26,19 kWh/(m².ano) do cenário 5 para o cenário 8.

Ademais, para os quatro cenários, a energia perdida pelo depósito ($Q_{st,loss}$) é inferior à energia produzida quer por parte do coletor, quer por parte da bomba de calor.

Para a categoria **Desempenho**:

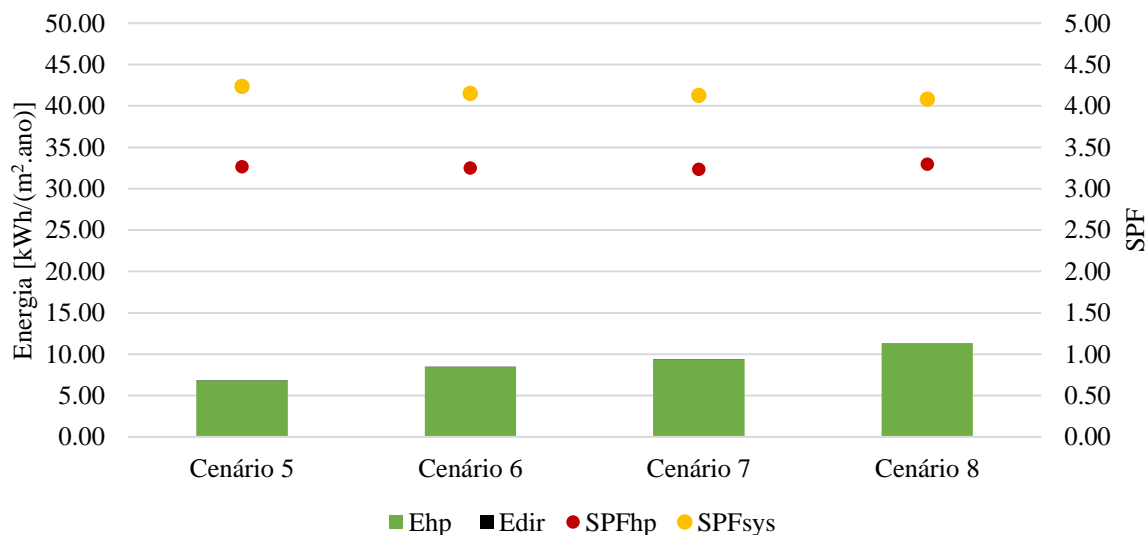


Figura 5.10 – Resultados obtidos para a categoria Desempenho para os cenários de Viseu.

Através da Figura 5.10 e da Tabela 5.3 verifica-se que todos os valores de SPF do sistema apresentam valores superiores a 4. A bomba de calor e o sistema apresentam SPF máximos de 3,30 (cenário 8) e 4,24 (cenário 5), respetivamente.

Observando a Figura 5.10 verifica-se que com o aumento de Ehp do cenário 5 para o 8 de 6,83 kWh/(m².ano) para 11,26 kWh/(m².ano) o fator de desempenho sazonal da bomba de calor não se altera muito variando entre 3,23 e 3,30.

Por outro lado, constata-se que o fator de desempenho sazonal do sistema tende a diminuir com o aumento da necessidade de aquecimento passando de 4,24 (cenário 5) para 4,08 (cenário 8).

5.3. Variante Temperatura limite do evaporador da bomba de calor

Para compreender a influência da temperatura limite do evaporador para o sistema, para os climas de Lisboa e Viseu, cenários 1 e 5 de aquecimento ambiente, foram simuladas várias temperaturas limite do evaporador para o edifício em estudo: -15°C, -12,5°C, -10°C, -7.5°C, -5°C, -2.5°C e 0°C.

5.3.1. Lisboa

De modo a analisar a variação da temperatura limite do evaporador da bomba de calor, para o clima de Lisboa, foram simuladas para o cenário base as diferentes temperaturas do evaporador, tendo sido obtidos os resultados apresentados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Valores do sistema para os vários valores de temperatura limite do evaporador da bomba de calor para o clima de Lisboa.

		Temperatura limite do evaporados da bomba de calor						
		-15	-12,5	-10	-7,5	-5	-2,5	0
Entrada [kWh/(m ² .ano)]	Q_{sol,dir}	6,51	6,47	6,39	6,43	6,47	6,47	6,55
	Q_{sol,hp}	19,18	19,23	19,28	19,24	19,20	19,14	18,70
	E_{hp}	7,57	7,58	7,59	7,61	7,57	7,56	7,24
	E_{dir}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,08	0,74
Saída [kWh/(m ² .ano)]	Q_{sol,dem}	1,04	1,03	1,03	1,04	1,03	1,02	1,03
	Q_{hp,dem}	5,56	5,35	5,55	5,56	5,53	5,55	5,21
	Q_{st,dem}	20,29	20,51	20,31	20,29	20,31	20,23	19,92
	E_{dir}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,08	0,74
Armazenamento [kWh/(m ² .ano)]	Q_{sol,st}	5,47	5,44	5,36	5,39	5,44	5,44	5,52
	Q_{hp,st}	21,19	21,44	21,32	21,29	21,24	21,14	20,73
	Q_{st,dem}	20,29	20,51	20,31	20,29	20,31	20,23	19,92
	Q_{st,loss}	6,37	6,37	6,37	6,39	6,37	6,35	6,33
Carga [kWh/(m ² .ano)]	Q_{AQS}	26,34	26,34	26,34	26,34	26,34	26,34	26,34
	Q_{AA}	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54
	Q_{total}	26,89	26,89	26,89	26,89	26,89	26,89	26,89
Desempenho	SPF_{hp}	3,53	3,54	3,54	3,53	3,54	3,53	3,58
	SPF_{sys}	3,55	3,55	3,54	3,54	3,54	3,52	3,37

Observando a Tabela 5.4 verifica-se a existência de três valores de temperatura limite do evaporador com especial interesse, nomeadamente as temperaturas de -5 °C, -2,5°C e 0°C. Para estes valores existe produção de energia por parte da resistência elétrica (E_{dir}) devido ao facto do evaporador atingir temperaturas inferiores ao limite imposto pelo cenário.

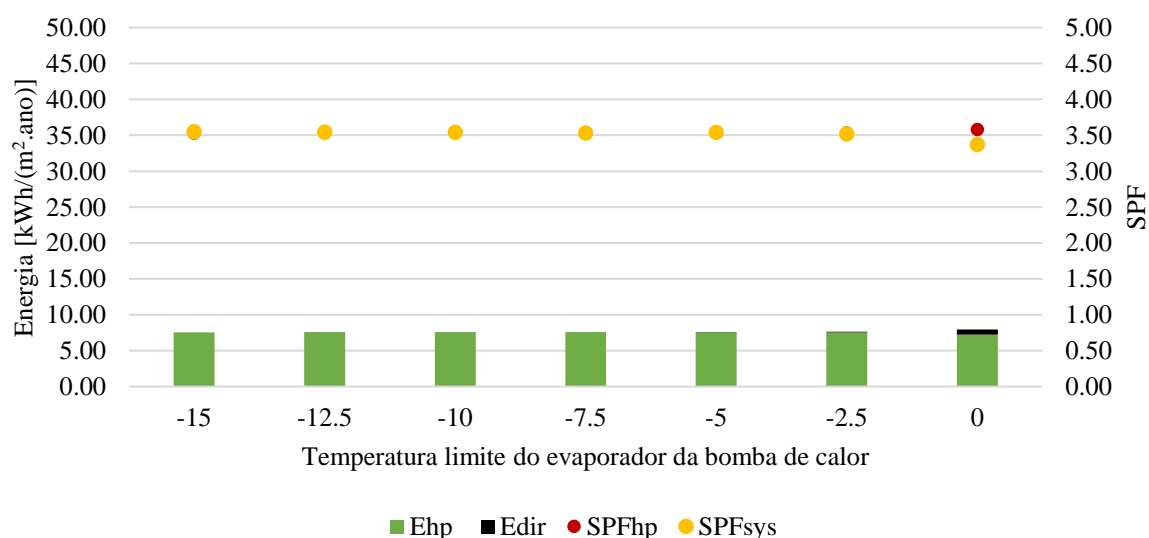


Figura 5.11 – Fator de desempenho sazonal da bomba e do sistema para o clima de Lisboa, para a variante temperatura limite do evaporador da bomba de calor.

Observando a Figura 5.11 verifica-se que, com os diferentes valores de temperatura limite do evaporador para o clima de Lisboa, o sistema não reflete uma variação significativa a nível do fator de desempenho sazonal da bomba e do sistema.

5.3.2. Viseu

De modo a analisar a variação da temperatura limite do evaporador da bomba de calor, para o clima de Viseu, foram simuladas para o cenário base as diferentes temperaturas do evaporador, tendo sido obtidos os resultados apresentados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Valores do sistema para os vários valores de temperatura limite do evaporador da bomba de calor para o clima de Viseu.

		Temperatura limite do evaporados da bomba de calor						
		-15	-12,5	-10	-7,5	-5	-2,5	0
Entrada [kWh/(m ² .ano)]	Q_{sol,dir}	14,05	14,05	14,01	13,98	14,00	14,03	13,96
	Q_{sol,hp}	15,49	15,55	15,51	15,37	14,93	13,84	13,07
	E_{hp}	6,83	6,76	6,76	6,64	6,36	5,54	5,06
	E_{dir}	0,01	0,01	0,08	0,36	1,03	2,87	4,11
Saída [kWh/(m ² .ano)]	Q_{sol,dem}	3,15	3,13	3,11	3,11	3,12	3,12	3,09
	Q_{hp,dem}	5,81	5,51	5,81	5,46	5,24	4,38	3,93
	Q_{st,dem}	20,02	20,34	19,98	20,05	19,61	18,61	17,85
	E_{dir}	0,01	0,01	0,08	0,36	1,03	2,87	4,11
Armazenamento [kWh/(m ² .ano)]	Q_{sol,st}	10,90	10,91	10,89	10,86	10,89	10,91	10,86
	Q_{hp,st}	16,51	16,82	16,48	16,57	16,08	15,02	14,22
	Q_{st,dem}	20,02	20,34	19,98	20,05	19,61	18,61	17,85
	Q_{st,loss}	7,39	7,39	7,39	7,38	7,36	7,32	7,24
Carga [kWh/(m ² .ano)]	Q_{AQS}	27,34	27,34	27,34	27,34	27,34	27,34	27,34
	Q_{AA}	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65
	Q_{total}	28,99	28,99	28,99	28,99	28,99	28,99	28,99
Desempenho	SPF_{hp}	3,27	3,30	3,30	3,32	3,35	3,50	3,58
	SPF_{sys}	4,24	4,28	4,24	4,14	3,92	3,44	3,16

Observando a Tabela 5.5 verifica-se que o aumento da temperatura limite do evaporador a partir do valor -12,5°C faz com que a bomba de calor deixe de funcionar, sendo necessário recorrer à energia produzida por parte da resistência elétrica (E_{dir}). Relativamente a esta última verifica-se um aumento no valor do consumo de energia de 0,01 kWh/(m².K) para um valor de temperatura limite do evaporador de -15 e -12,5°C, para 4,11 kWh/(m².K), para um valor de temperatura limite do evaporador de 0°C.

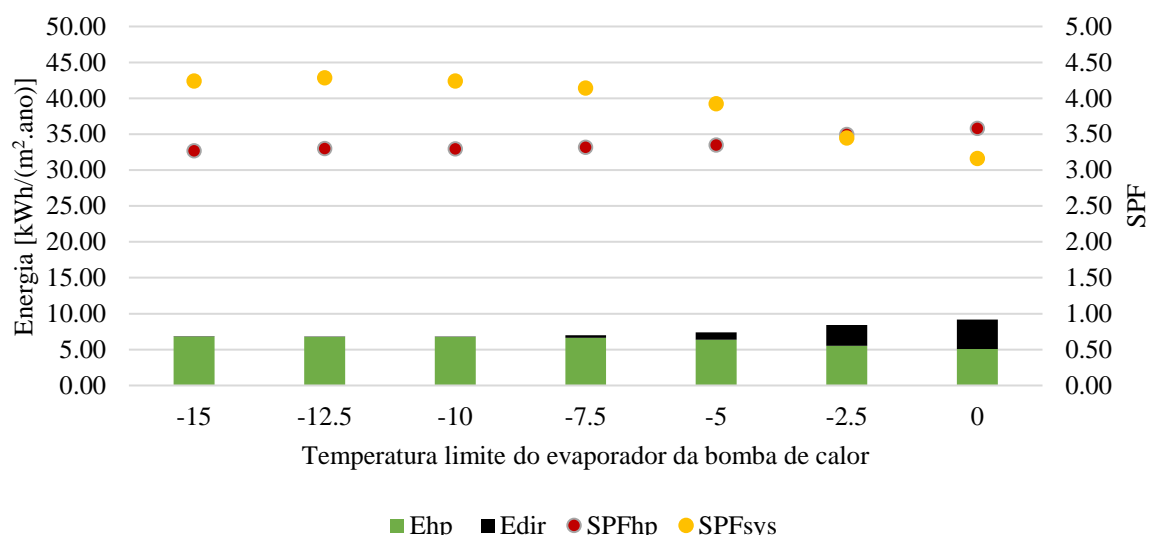


Figura 5.12 – Fator de desempenho sazonal da bomba e do sistema para o clima de Viseu, para a variante temperatura limite do evaporador da bomba de calor.

Observando a Figura 5.12 verifica-se que entre as temperaturas limite do evaporador de $-12,5^{\circ}\text{C}$ e 0°C ocorre um decréscimo no fator de desempenho sazonal do sistema, de 4,28 para 3,16, respetivamente. Para esta variante obtém-se um valor máximo de fator de desempenho sazonal do sistema de 4,28, quando a temperatura limite do evaporador apresenta um valor de $-12,5^{\circ}\text{C}$.

5.4. Variante Área de coletor

De modo a perceber a influência da área de coletor para o sistema para o clima de Lisboa e Viseu (cenários 1 e 5 de AA), foram consideradas áreas de coletor de: 80 m^2 , 90 m^2 , 100 m^2 , 110 m^2 , 120 m^2 e 130 m^2 .

Estes valores foram escolhidos respeitando a legislação portuguesa, que refere que os coletores solares devem ocupar, no máximo, 50% da área útil de telhado [21]. Deste modo, sendo a área útil total de telhado de $266,83\text{ m}^2$, todas as áreas de estudo de coletor solar selecionadas encontram-se abrangidas pela legislação.

Os resultados obtidos apresentam unidades expressas em metros quadrados de coletor por metros quadrados de aquecimento [m^2/m^2], sendo que o último possui uma área total de 772 m^2 .

5.4.1. Lisboa

A Tabela 5.6 apresenta os resultados obtidos para o sistema em função da área de coletor por área de aquecimento, para o clima de Lisboa.

Tabela 5.6 – Resultados obtidos para o sistema em função da área de coletor escolhida sobre a área total de aquecimento, para o clima de Lisboa, expressos em kWh/(m².ano).

		Área do coletor [m ² /m ²]					
		0,10	0,12	0,13	0,14	0,16	0,17
Entrada [kWh/(m ² .ano)]	Q_{sol,dir}	5,45	5,76	6,10	6,25	6,62	6,83
	Q_{sol,hp}	19,44	19,42	19,28	19,30	19,12	19,07
	E_{hp}	8,16	7,97	7,82	7,70	7,54	7,43
	E_{dir}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Saída [kWh/(m ² .ano)]	Q_{sol,dem}	0,88	0,97	0,98	0,99	1,06	1,12
	Q_{hp,dem}	6,23	5,89	5,86	5,61	5,52	5,34
	Q_{st,dem}	19,78	20,03	20,05	20,29	20,31	20,43
	E_{dir}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Armazenamento [kWh/(m ² .ano)]	Q_{sol,st}	4,57	4,79	5,12	5,25	5,56	5,71
	Q_{hp,st}	21,37	21,50	21,21	21,37	21,13	21,16
	Q_{st,dem}	19,78	20,03	20,05	20,29	20,31	20,43
	Q_{st,loss}	6,16	6,26	6,28	6,34	6,38	6,43
Carga [kWh/(m ² .ano)]	Q_{AQS}	26,34	26,34	26,34	26,34	26,34	26,34
	Q_{AA}	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55
	Q_{total}	26,89	26,89	26,89	26,89	26,89	26,89
Desempenho	SPF_{hp}	3,38	3,44	3,47	3,51	3,53	3,57
	SPF_{sys}	3,30	3,37	3,44	3,49	3,56	3,62

Observando a Tabela 5.6 verifica-se que a produção direta solar para AQS e AA e para o depósito (Q_{sol,dir}) aumenta à medida que a área de coletor por área de aquecimento aumenta. Contrariamente, a produção de energia pelo coletor, que é fornecida à bomba (Q_{sol,hp}), tende a diminuir com o aumento da área de coletor por área de aquecimento. No entanto, mais de 70% da produção solar tem como destino a bomba de calor.

Para as seis áreas de estudo verifica-se que o sistema consegue responder a todas as necessidades de calor existentes, não havendo consumo de energia por parte da resistência elétrica.

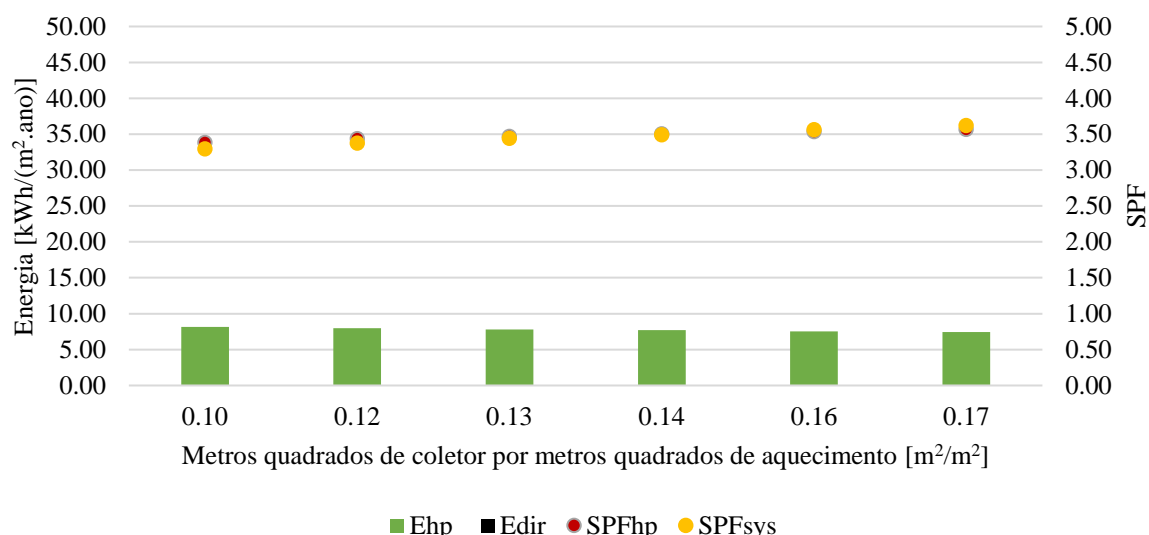


Figura 5.13 – Fator de desempenho sazonal da bomba e do sistema para o clima de Lisboa, para a variante área de coletor solar.

Observando a Figura 5.13 verifica-se que entre 0,10 e 0,14 m^2/m^2 o SPF da bomba é superior ao SPF do sistema. A partir de 0,14 m^2/m^2 verifica-se o contrário.

Outro fator a constatar é o aumento do SPF, quer da bomba quer do sistema, com o aumento da área de coletor, verificando-se um máximo de 3,57 para a bomba e 3,62 para o sistema, para a área de coletor sobre a área total de aquecimento de 0,17 m^2/m^2 .

5.4.2. Viseu

A Tabela 5.7 apresenta os resultados obtidos para o sistema em função da área de coletor por área de aquecimento, para o clima de Viseu.

Tabela 5.7 – Valores em $kWh/(m^2.ano)$ para o sistema em função da área de coletor escolhida sobre a área útil total de aquecimento para o clima de Viseu.

		Área do coletor [m^2/m^2]					
		0,10	0,12	0,13	0,14	0,16	0,17
Entrada [$kWh/(m^2.ano)$]	$Q_{sol,dir}$	12,72	13,00	13,52	13,96	14,12	14,36
	$Q_{sol,hp}$	15,72	15,83	15,66	15,50	15,51	15,45
	E_{hp}	7,47	7,22	6,97	6,84	6,75	6,64
	E_{dir}	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00
Saída [$kWh/(m^2.ano)$]	$Q_{sol,dem}$	2,87	2,89	3,00	3,13	3,09	3,28
	$Q_{hp,dem}$	6,31	6,05	5,95	5,75	5,69	5,65
	$Q_{st,dem}$	19,79	20,04	20,03	20,10	20,19	20,06
	E_{dir}	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00
Armazenamento [$kWh/(m^2.ano)$]	$Q_{sol,st}$	9,85	10,11	10,52	10,83	11,03	11,09
	$Q_{hp,st}$	16,89	17,02	16,71	16,61	16,59	16,46
	$Q_{st,dem}$	19,79	20,04	20,03	20,10	20,19	20,06
	$Q_{st,loss}$	6,95	7,10	7,21	7,34	7,42	7,49
Carga	Q_{AQS}	27,34	27,34	27,34	27,34	27,34	27,34

[kWh/(m ² .ano)]	Q_{AA}	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65
	Q_{total}	28,99	28,99	28,99	28,99	28,99	28,99
Desempenho	SPF_{hp}	3,10	3,19	3,25	3,27	3,30	3,33
	SPF_{sys}	3,87	4,01	4,15	4,23	4,29	4,36

Observando Tabela 5.7 verifica-se que a produção direta solar para AQS e AA e para o depósito ($Q_{sol,dir}$) aumenta à medida que a área de coletor por área de aquecimento aumenta. Contrariamente, a produção de energia pelo coletor, que é fornecida à bomba ($Q_{sol,hp}$), tende a diminuir com o aumento da área de coletor por área de aquecimento.

Há exceção do caso 0,17 [m²/m²], verifica-se para todos os cenários que o sistema não consegue responder a todas as necessidades de calor existentes, existindo consumo de energia por parte da resistência elétrica.

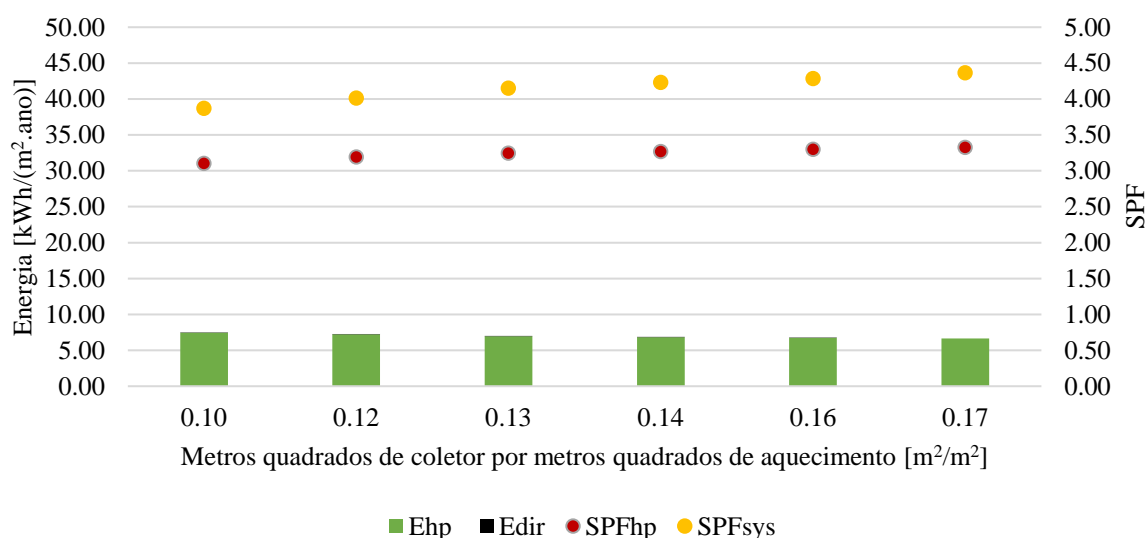


Figura 5.14 – Fator de desempenho sazonal da bomba e do sistema para o clima de Viseu, para a variante área de coletor solar.

Observando a Figura 5.14 constata-se um aumento do SPF, quer da bomba quer do sistema, com o aumento da área de coletor, verificando-se um máximo de 3,33 para a bomba e 4,36 para o sistema, para a área de coletor sobre a área total de aquecimento de 0,17 m²/m².

6. Conclusões e trabalho futuro

6.1. Conclusões

Um edifício com a mesma envolvente opaca, o mesmo tipo de vãos envidraçados, a mesma carga interna e o mesmo tipo de ocupação, apresenta uma maior necessidade de aquecimento de águas quentes sanitárias e de aquecimento ambiente para o clima de Viseu, comparativamente ao clima de Lisboa.

Constata-se que, quer para o clima de Lisboa quer para o clima de Viseu, se existirem edifícios bem isolados, em termos de envolvente opaca e vãos envidraçados, as necessidades de aquecimento ambiente são pequenas: 0,54 kWh/(m².ano), para Lisboa, e 1,65 kWh/(m².ano), para Viseu. Num cenário sem a aplicação de isolamento térmico verifica-se que as necessidades de aquecimento ambiente aumentam para 14,76 kWh/(m².ano), para Lisboa e para 18,74 kWh/(m².ano), para Viseu. Estes valores são aproximadamente 27 e 11 vezes superiores, respetivamente, face ao edifício bem isolado.

Ainda para a variante aquecimento ambiente verifica-se que, no caso de Lisboa, foram obtidos resultados de fatores de desempenho sazonal da bomba e do sistema superiores a 3,40. Contudo, não existe uma diferença de valores relevante, sendo possível concluir que devido aos baixos valores de energia de $Q_{sol,dir}$, a bomba de calor é a componente que produz a maior parte da energia necessária para responder às necessidades de aquecimento de águas quentes sanitárias e de aquecimento ambiente.

Para Viseu, ao nível da variante aquecimento ambiente, verifica-se que os resultados obtidos para os fatores de desempenho sazonal da bomba são superiores a 3,20, considerado um valor de SPF elevado. Contudo, a maior evidência verifica-se a nível do sistema, onde este chega a atingir um valor máximo de SPF de 4,24 para o cenário 5. Para os cenários 5, 6, 7 e 8 os valores de SPF do sistema são bastante superiores ao SPF da bomba, evidenciando a importância da componente solar para produção de energia.

Comparando os dois sistemas para a variante AA, verifica-se que a energia utilizada para dar resposta às necessidades de aquecimento nos dois climas transita através do depósito. Este facto deve-se à potência da bomba de calor estar sobredimensionada para as necessidades do edifício presente nos climas de Lisboa e Viseu, o que leva a bomba de calor a produzir mais energia do que a que o edifício realmente necessita, implicando que o excedente de energia produzida transite para o depósito.

A nível do SPF do sistema para o clima de Lisboa e Viseu, para a variante AA, verifica-se que Viseu apresenta um SPF_{sys} superior. Através da Tabela 4.6 constata-se que para os meses de março, abril e maio, Viseu apresenta temperaturas médias mensais de 10,89°C, 12,22°C e 15,24°C, respetivamente sendo a diferença face a Lisboa de 1,95°C, 2,42°C e 2,10°C. Apesar de Viseu apresentar valores de temperatura exterior média mensal menor para estes meses, a radiação global é superior, bem como as suas necessidades de aquecimento. Deste modo, irá existir um maior número de períodos onde existe necessidades de aquecimento e onde a componente coletor possa produzir energia para responder a essa necessidade. Como o coletor tem maior impacto na produção de energia para responder às necessidades de aquecimento de AQS e AA para o clima de Viseu, este clima apresenta SPF_{sys} superiores ao que se verifica para o clima de Lisboa. Assim, conclui-se que o sistema é uma boa solução para zonas que possuam uma zona climática de inverno de categoria I2 e um valor de GD igual ou superior a 1563.

No que diz respeito à variante temperatura limite do evaporador da bomba de calor verifica-se, para o clima de Lisboa, que os valores limites podem aumentar até -7,5°C sem que exista consumo de energia por parte da resistência elétrica. Para um aumento até -2,5°C as consequências são mínimas. Os valores

obtidos para o SPF da bomba e do sistema, para as várias temperaturas do evaporador, não apresentam valores com alterações significativas. Deste modo, é possível concluir que, para este clima, a temperatura limite do evaporador da bomba de calor para temperaturas limite de evaporador até $-7,5^{\circ}\text{C}$ não é uma variante limitante deste sistema. Sendo a temperatura limite do evaporador da bomba de calor um fator limitante na escolha da bomba de calor a instalar, o facto de a temperatura poder subir até -5°C sem consequências no consumo, ou mesmo até $-2,5^{\circ}\text{C}$ com consequências mínimas, aumenta consideravelmente o poder de escolha deste equipamento para este clima.

Para Viseu conclui-se que, relativamente à temperatura limite do evaporador da bomba de calor, esta é uma variante limitante para este clima. A partir da temperatura limite do evaporador da bomba de calor de $-7,5^{\circ}\text{C}$ o consumo de energia por parte da resistência eléctrica aumenta significativamente, levando à diminuição do fator de desempenho sazonal do sistema.

Por fim, para a variante área do coletor verifica-se, para ambos os climas, que o aumento da área de coletor produz um aumento do fator de desempenho sazonal da bomba e do sistema. Para Lisboa obtém-se um SPF máximo da bomba e do sistema de 3,57 e 3,62, respetivamente. Para Viseu obtém-se um SPF máximo da bomba e do sistema de 3,33 e 4,36, respetivamente.

6.2. Trabalho Futuro

Uma vez que a maioria da energia utilizada para dar resposta às necessidades de aquecimento transita através do depósito provavelmente pelo facto de existir excesso de produção por parte da bomba de calor, seria interessante avaliar o desempenho do sistema para valores de potência de bombas de calor inferiores para os climas de Lisboa e Viseu, para as mesmas necessidades de aquecimento de águas quentes sanitárias e aquecimento ambiente.

Por último, seria interessante estudar, para ambos os climas, a versão do sistema que permite um aquecimento prévio do depósito para responder às necessidades de águas quentes sanitária. Para os climas de Lisboa e Viseu, a energia produzida pelo componente solar, utilizada diretamente para responder às necessidades de aquecimento, deverá ser maior, o que resultaria em SPF de sistema significativamente superiores.

7. Referências

- [1] «Consumo de energia eléctrica: total e por tipo de consumo», *PORDATA*, 2018. Disponível em: <https://www.pordata.pt/Portugal/Consumo+de+energia+eléctrica+total+e+por+tipo+de+consumo-1124>. [Acedido: 05-Jul-2018].
- [2] Instituto Nacional de Estatística, *Censos 2011 Resultados Definitivos - Portugal*. Lisboa-Portugal, 2012.
- [3] Decreto-Lei n.º 80/2006, «Regulamento das Características do Comportamento Térmico de Edifícios». pp. 2416–2468, 2006.
- [4] ADENE, «Eficiência Energética nos Edifícios», 2018. Disponível em: <https://www.adene.pt/edificios/>. [Acedido: 01-Fev-2018].
- [5] Ministérios das Finanças e da Administração Pública e da Economia da Inovação e do Desenvolvimento, *Portaria n.º 303/2010 de 8 de junho*. 2010, p. 2010.
- [6] International Energy Agency, «Portugal», 2018. Disponível em: <https://www.iea.org/countries/membercountries/portugal/>. [Acedido: 02-Fev-2018].
- [7] Energie, «Energia Solar Termodinâmica», 2016. Disponível em: www.energie.pt/pt/energia-solar-termodinamica. [Acedido: 05-Fev-2018].
- [8] E. Frank, M. Haller, S. Herkel, e J. Ruschenburg, «Systematic Classification of Combined Solar Thermal and Heat Pump Systems», 2010.
- [9] M. S. Buker e S. B. Riffat, «Solar assisted heat pump systems for low temperature water heating applications : A systematic review», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 55, pp. 399–413, 2016.
- [10] Fraga, C., Mermoud, F., Hollmuller, P., Pampaloni, E., Lachal, B., 2015. Large solar driven heat pump system for a multifamily building: long term in-situ monitoring. *Solar Energy* 114, 427–439.
- [11] W. Li, Y. Zhou, K. Cetin, J. Eom, Y. Wang, e G. Chen, «Modeling urban building energy use : A review of modeling approaches and procedures», vol. 141, 2017.
- [12] A. M. Rodrigues, A. C. da Piedade, e A. M. Braga, *Térmica de Edifícios*, 1ª. 2009.
- [13] L. A. Pina dos Santos, Carlos ; Matias, «Coeficientes De Transmissão Térmica De Elementos Da Envoltura Dos Edifícios». 2006.
- [14] O. G. D. E. Transfer e N. D. E. Calor, «35088-(58)», n. 58, pp. 58–87, 2013.
- [15] A. Pinto, «Comportamento Térmico De Caixilharia Exterior - Coeficientes de transmissão térmica referentes ao mercado nacional», n. March, 2014.
- [16] M. J. N. O. Panão e M. C. Brito, «Energy & Buildings Modelling aggregate hourly electricity consumption based on bottom-up building stock», vol. 170, pp. 170–182, 2018.
- [17] «Weather Data». Disponível em: <https://energyplus.net/weather>.
- [18] LNEG, «CLIMAS-SCE - Software para o Sistema Nacional de Certificação de Edifícios», 2012. Disponível em: <http://www.lneg.pt/servicos/328/2263/>.
- [19] Ministério da economia e do emprego, «Decreto-Lei n.º 118/2013 de 20 de agosto». pp. 4988–5005, 2013.
- [20] M. Ferreira e H. Corvacho, «Natural Ventilation Potential in Portuguese Residential Buildings under Winter Conditions – An Opportunity for Hybrid Ventilation», vol. 3315, 2016.
- [21] Diário da República 1ª Série Nº 67 (4 de abril de 2006), «Decreto de Lei n.º 80/2006 de 4 de Abril». 1990.

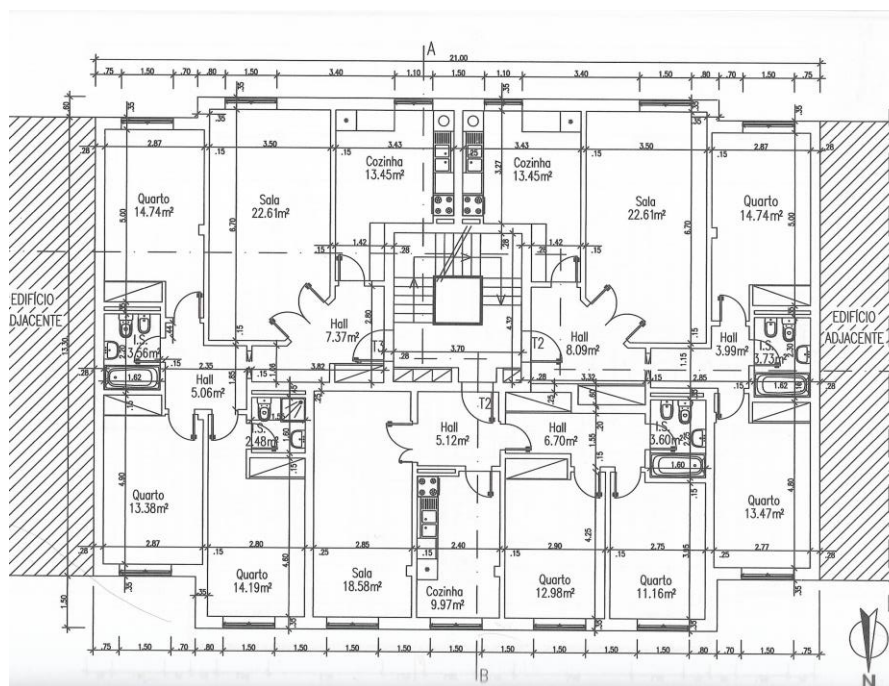


Figura 8.4 – Piso1, Piso2 e Piso3 do edifício do caso de estudo [12].